УДК 521.1+629.783+519.85+523.44
№ держреєстрації 0118U001830
Інв. №

Національна академія наук України

Головна астрономічна обсерваторія

03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27;
тел. (044) 526 4762, (044) 526 4763; факс (044) 526 2147

“Затверджую”

Директор ГАО НАН України
Академік НАН України

_____Я. С. Яцків

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

“Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії”

(остаточний)

Науковий керівник НДР
академік НАН України

_____Я. С. Яцків

Рукопис завершено 20 грудня 2018 р.

Результати роботи розглянуто Вченою Радою ГАО НАН України,
протокол № 19 від 21 грудня 2018 р.

2018

СПИСОК АВТОРІВ

Гол. наук. співроб. ГАО НАН України, д.ф.-м.н.		Я.С. Яцків (11, загальна підготовка)
С.н.с. ГАО НАН України, д.т.н.		В.Є. Саваневич (4, 6, 8.8, Б, В; загальна підготовка і редагування)
Зав. відділом ГАО НАН України, к.ф-м.н.		І.Б. Вавилова (1, Б.1, Б.3; загальна підготовка і редагування)
Заст. кер-ка ННЦ ГАО НАН України, к.т.н.		Я.О. Романюк (загальна підготовка і редагування)
С.н.с. ГАО НАН України, к.ф.-м. н.		Ю.М. Іващенко (8.5; Б.2, Б.5)
С.н.с. ГАО НАН України, к.ф.-м.н.		О.О. Хода (11)
С.н.с. ГАО НАН України, к.т.н.		О.А. Жаліло (9, 10, 11)
Н.с. НДІ астрономії ХНУ ім. В.Н.Каразіна, к.т.н.	договор ЦПХ	С.В. Хламов (5, А.1, А.2, Б, В)
Пров. інженер ХНУРЕ	договор ЦПХ	А.В. Погорелов (1, 2, Б.1, Б.5, В)
Пров. інженер НДІ мікрографії	договор ЦПХ	Є.М. Діков (3, Б.2, В)
Н.с. НДІ «Астрономічна обсерваторія» ОНУ ім. І.І.Мечникова	договор ЦПХ	В.І. Кашуба (8.1, 8.10)
Н.с. НДІ «Астрономічна обсерваторія» ОНУ ім. І.І.Мечникова	договор ЦПХ	Л.С. Шакун (7, 8.8)
Зав. лаб. НДІ «МАО», к.ф-м.н.	договор ЦПХ	Н.В. Майгурова (8.2)
В.о. заст. директора НДІ «МАО», к.ф-м.н.	договор ЦПХ	Ю.І. Процюк (8.6)
М.н.с. лаб. косм. досл. «УжНУ»	договор ЦПХ	В.І. Кудак (8.3, 8.10)
П.н.с . НДІ астрономії ХНУ ім. В.Н.Каразіна, к.ф-м.н.	договор ЦПХ	В.С. Ахметов (8.4, 8.10)
Інженер ЦПОСІ НЦУВКЗ ДКА України	договор ЦПХ	Т.О. Дементьев (8.7)

РЕФЕРАТ

Звіт про проект: 354 с., 54 таблиці, 177 рисунків, 3 додатки, 115 джерел.

ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ВИЯВЛЕННЯ АСТЕРОЇДІВ, ПОБУДОВА КРИВИХ БЛИСКУ, ВИМІРЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ ШСЗ, СЕГМЕНТАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ НЕБЕСНИХ ОБ'ЄКТІВ, РОЗРАХУНОК АПЕРТУРНОЇ ЯСКРАВОСТІ, ПМЗ ФОТОМЕТРІЇ НЕБЕСНИХ ОБ'ЄКТІВ.

Об'єкт дослідження – програмно-математичне забезпечення (ПМЗ) CoLiTec для вимірювання положень та параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл Сонячної системи; програмно-математичне забезпечення післясеансної обробки спостережень багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ) космічних апаратів.

Мета науково-технічного проекту – 1) вдосконалення, тестування та впровадження створеного українськими розробниками оригінального ПМЗ CoLiTec для вимірювання положень та параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл Сонячної системи, які реєструються над територією України, в інтересах національної системи контролю космічного простору (СККП) та навколоземної астрономії; 2) тестування програмно-математичного забезпечення післясеансної обробки спостережень багато-позиційної фазової системи траєкторних вимірювань літальних апаратів.

Методи досліджень – теорія обробки зображень, обчислювальних методів, математичної статистики та обробки спостережних даних.

Вдосконалено обчислювальні методики та ПМЗ сегментації зображень та фотометрії небесних об'єктів на серії ПЗЗ кадрів, ПМЗ сервісу, обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки, дослідження та тестування ПМЗ CoLiTec на телескопах астрономічних обсерваторій України.

Визначено доцільність використання ПМЗ CoLiTec в обсерваторіях України при обробці даних супутникових ПЗЗ-спостережень, астероїдних оглядів та фотометричних спостереженнях змінних зір. Тим самим буде зменшено залежність національної СККП та навколоземної астрономії

України від імпортованого наукоміського програмного забезпечення. Перш за все, ПМЗ CoLiTec позбавляє залежності від російської програми Apex II у супутникових високоточних ПЗЗ-спостереженнях.

Створено прототип (експериментальний зразок) програмно-математичного забезпечення післясеансної обробки спостережень БФСТВ для траєкторних визначень КА (обраних GPS-супутників). Проведені тестові випробування прототипу ПМЗ з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України – проведено моделювання обробки результатів спостережень обраних з поточного робочого сузір'я GPS-супутників (як контрольованих космічних апаратів) і оцінки їх поточних координат і складових вектора швидкості з одночасною оцінкою розбіжностей шкал часу рознесених в просторі приймачів інтерферометра БФСТВ. Отримані експериментальні результати цілком підтверджують правильність концепції побудови, функціонування БФСТВ, а також її працеспроможність.

Розроблені та впроваджені програмно-математичні забезпечення показали свою ефективність у застосуванні для завдань навколоземної астрономії та системи контролю космічного простору.

ЗМІСТ

Зміст…….. 5
Скорочення та умовні позначення……. 10
Вступ…… 11
1 Особливості умов спостереження, що впливають на формування зображень небесних об'єктів на цифрових зображеннях….. 15
2 Модернізація обчислювальних методів сегментації зображень штучних супутників Землі та малих тіл Сонячної системи на астрономічних ПЗЗ-кадрах…….. 21
2.1 Попередній аналіз, завдання і можливі принципи сегментації зображень, що досліджуються…… 21
2.2 Обчислювальний метод сегментації зображень поодиноких об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім виділенням стартових пік селів…… 34
2.3 Обчислювальний метод сегментації компактних груп статистично пов'язаних зображень близьких об'єктів на цифрових зображеннях…… 59
3 Модернізація обчислювальних методів та ПМЗ фотометрії небесних об’єктів на серії ПЗЗ кадрів…… 65
3.1 Обчислювальний метод автоматичного вибору на кадрі зір порівняння…… 65
3.2 Обчислювальний метод розрахунку апертурної яскравості зображень небесних об’єктів на ПЗЗ кадрах…… 67
3.3 Обчислювальний метод оцінки блиску небесних об’єктів на кадрах серії…….. 78
4 Обчислювальний метод виділення зображень об'єктів, змазаних власним рухом…… 84
5 Стислий опис розробки ПМЗ сервісу, обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки…….. 94

6 Алгоритми дослідження показників якості функціонування програми обробки кадрів астероїдних оглядів…….. 103

6.1 Порівняльний аналіз програмних пакетів, що реалізують алгоритми обчислення показників якості функціонування програми обробки кадрів астероїдних оглядів…….. 103

6.2 Алгоритм дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, що зберігаються в архіві МРС або містяться в вимірах, відповідних досліджуваним кадрам…….. 110

7 Стислий опис методики порівняння результатів вимірювань видимих координат ШСЗ з оптичних спостережень з їх високоточними ефемеридами…… 132

8 Результати дослідження ПМЗ CoLiTec на телескопах астрономічних обсерваторій України……. 142

8.1 Результати досліджень та тестування ПМЗ з автоматизованої обробки зображень штучних супутників Землі, малих тіл Сонячної системи та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопі ОМТ-800 НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечнікова…….. 142

8.2 Результати досліджень та тестування ПМЗ з автоматизованої обробки зображень малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопі КТ-50 НДІ «Миколаївська астрономічна обсерватория» (перша частина)……. 148

8.3 Результати досліджень та тестування ПМЗ з автоматизованого спостереження штучних супутників Землі, малих тіл Сонячної системи та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопах ЧВ-400 та BRC250 ЛКД ДВНЗ «УжНУ»……... 154

8.4 Результати досліджень та тестування ПМЗ з автоматизованого спостереження астероїдів та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопі АЗТ-8 НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна…… 161

8.5 Результати досліджень та тестування ПМЗ з автоматизованого спостереження штучних супутників Землі та малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопах ААО 165

8.6 Тестування ПМЗ з автоматизованої обробки зображень малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTec на телескопі КТ-50 НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (друга частина)….. 169

8.7 Тестування пмз з автоматизованого спостереження малих тіл сонячної системи на серіях пзз-кадрів CoLiTec на телескопі АЗТ-28 квантово-оптичної станції «Сажень-с» Центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля НЦУВКЗ ДКА України……..... 179

8.8 Результати досліджень показників точності вимірювань CoLiTecSAT за допомогою їх порівняння з високоточними ефемеридами по обраним ШСЗ……... 183

8.9 Типові приклади виявлення зображень об'єктів, змазаних їх власним рухом…….. 198

8.10 Типові приклади кривих блиску зір, що досліджувались……. 210

Висновки щодо використання та впровадження програмно-математичного забезпечення CoLiTec……..... 244

Рекомендації…… 249

9 Науково-технічне обґрунтування багатопозиційної фазової системи траекторних вимірювань (БФСТВ)…… 252

9.1 Принципи побудови та функціонування БФСТВ. Склад БФСТВ. Реалізація системи на основі поєднання принципів побудови багатопозиційних фотометричних систем і сучасних ГНСС-технологій точного позиціонування……. 252

9.2 Задачі і функції багатопозиційної фазової системи траекторних вимірювань для визначення параметроів руху високо динамічних літальних апаратів (ВДЛА) і перспективних космічних апаратів (КА)…. 261

9.3 Наземне обладнання БФСТВ……... 265

9.4 Принципи побудови і функціонування бортової апаратури (БА) БФСТВ…….. 270
9.5 Експериментальне підтвердження досягнення заданих характеристик точності БФСТВ…… 273
10 Архітектура програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) післясеансної обробки спостережень БФСТВ…….. 286
10.1 Завдання і функції програмно-математичного забезпечення сумісної обробки спостережень параметрів сигналів від контрольованих обєктів і сигналів ГНСС. Структура ПМЗ…….. 276
10.2 Особливості ПМЗ для обробки спостережень контрольованих об'єктів (ВДЛА або КА) при наземному і морсткому варіантах реалізації БФСТВ…….. 278
10.3 Експериментальний програмний комплекс «OCTAVA» - основа для розробки ПМЗ БФСТВ…… 279
10.4 Пропозиції по складу робіт в рамках ДКР в частині створення ПМЗ обробки вимірювальної інформації БФСТВ…… 282
11 Обробка результатів спостережень вибраних GPS-супутників з поточного робочого сузір'я та оцінка їх координат…… 285
11.1 Постановка задачі…….. 285
11.2 Апріорна оцінка точності визначення координат КА (вибраного супутника GPS)…… 288
11.3 Апостеріорна оцінка точності визначення параметрів траєкторії супутника GPS PRN 23 по реальним спостереженням БФСТВ – результати експериментальних досліджень…….. 297
Висновки щодо програмно-математичного забезпечення та тестування багатопозиційної фазової системи траекторних вимірювань 306
Перелік джерел посилання…….. 307
Публікації виконавців у 2018 році…… 317

Науково-технічна документація (див. CD-ROM)

Додаток А.1 Керівництво користувача ПМЗ CoLiTec ViO публікації кривих блиску ШСЗ…… 320

Додаток А.2 Керівництво користувача ПМЗ CoLiTec служби обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки……..... 338

Додаток А.3 Акти впровадження ПМЗ CoLiTec……..... 346

Додаток Б. Документи для подання Свідоцтва про реєстрацію авторського права на програму (див. CD-ROM):

Б.1 служби обробки та зберігання CCD-кадрів та даних їх обробки

Б.2 автоматичного супроводу та відображення об’єктів на CCD-кадрах

Б.3 розрахунку інструментального блиску зірок на CCD-кадрах з нормуванням

Б.4 узгодженої фільтрації кадрів телескопу, що отримані без добового ведення

Б.5 оцінки положення об'єкта на цифровому кадрі з профілем зображення, що не задається аналітично

Додаток В. Тексти розроблених та модифікованих ПМЗ (див. CD-ROM)

В.1 Текст ПМЗ CoLiTec ViO публікації кривих блиску ШСЗ

В.2 Текст ПМЗ CoLiTec ViO для публікації кривих блиску змінних зір

В.3 Текст ПМЗ CoLiTec служби обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки

В.4 Текст ПМЗ розрахунку апертурної яскравості зображень небесних об’єктів на ПЗЗ кадрах

В.5 Текст ПМЗ сегментації зображень поодиноких об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім виділенням стартових пікселів

В.6 Текст ПМЗ оцінки блиску змінних зір на кадрах серії

В.7 Текст ПМЗ сегментації компактних груп статистично пов'язаних зображень близьких об'єктів на цифрових зображеннях

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ПЗЗ (CCD) – прилади з зарядовим зв’язком (charge-coupled device).

СККП – система контроля космічного простору.

ПМЗ, ПЗ – програмно-математичне забезпечення.

ШСЗ – штучні супутники Землі.

ОВКО – область внутрішньо кадрової обробки.

FWHM – full width at half maximum (ширина зображення на рівні половини його амплітуди).

СКВ, СКП – середньо-квадратичне відхилення (погрішність).

UML – Unified Modeling Language (уніфікована мова моделювання).

ВСШ (SNR) – відношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio).

MPC – Minor Planet Center (Центр малих планет).

NEOCP – NEO Confirmation Page (сторінка підтверджень NEO)

NEO – Near Earth Object (об’єкт, який наближається до Землі).

СК, ГСК – система координат, Грінвічська система координат.

ССО – об’єкт Сонячної системи.

БФСТВ – багатопозиційна фазова (фазометрична) система траєкторних вимірювань.

ВП – вимірювальний пункт.

КА, ЛА – космічний апарат (супутник), літальний апарат.

КО – контролюємий об’єкт.

РС – референцна станція.

РФН – розрізнення фазової неоднозначності.

СВШ – складові вектору швидкості.

GPS – Global Positioning System - глобальна система визначення місцеположення (позиціонування).

GNSS – (ГНСС) Global Navigation Satellite System, глобальні навігаційні супутникові системи.

IGS International GNSS Service (міжнародна організація надання послуг (GNSS-інформації).

ВСТУП

Велика кількість спостережних даних обумовлює необхідність їх автоматичної та автоматизованої обробки. Виходячи з цього розробка програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) для навколоземної астрономії та контролю космічного простору (ККП) – одна з визначальних умов сталого розвитку зазначених галузей. Наукове ПМЗ є формалізованим досвідом вчених, замовників та розробників. ПМЗ у галузі навколоземної астрономії та ККП є наукомістким, його складність значно перевищує складність коду. Обробка вимірювань виконується ПМЗ, яке реалізує відповідні обчислювальні методи. Таким чином, рівень ПМЗ та рівень закладених в нього обчислювальних методів (разом з рівнем засобів та методик вимірювань) визначає рівень досліджень.

Автоматична та автоматизована обробка астрономічних ПЗЗ-зображень є сучасним світовим трендом розвитку ККП та навколоземної астрономії. Крім того, спостереження супутників національними засобами контролю та аналізу космічної обстановки є складовою національної безпеки України. На сьогодні в Україні існують засоби спостереження, але кращі з них використовують російське ПМЗ Apex II, яке розповсюджувалось не публічно і використання якого в інтересах національної безпеки та оборони України є порушенням ліцензії. Його нові версії вже біля 5 років не поставляються спостерігачам з України. Створення, тестування, впровадження та дослідження відповідного вітчизняного ПМЗ є важливим кроком і актуальним завданням українських вчених та розробників.

Значна частина роботи приділена ПМЗ CoLiTec не має аналогів в Україні, а програмне забезпечення автоматичної обробки кадрів та автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи зарекомендувало себе на міжнародному рівні. Близьких за напрямом існуючих вітчизняних аналогів ПМЗ CoLiTec на цей час в Україні не існує. У відкритому доступі ПЗ аналогічного CoLiTec світі у не багато. На сайті проекту GAIA FUN SSO

відзначено тільки 4 програми, які брали участь в турнірі проекту GAIA FUN SSO 2014 р. CoLiTec переміг в номінації «робота з тьмяними об'єктами», а також «автоматичний пошук об'єктів».

Аналогом ПМЗ CoLiTecSat є російське ПМЗ Apex II, яке не може бути використаним українськими оптичними засобами спостереження. Відсутність вітчизняного ПЗ для вимірювання положення ШСЗ на цифрових кадрах є вузьким місцем українського контролю космічного простору, зокрема вузьким місцем СКАКО. Аналогами CoLiTecVS є, наприклад, чеське ПЗ Muniwin (http://c-munipack.sourceforge.net/), або канадське MaxIm DL (http://maxim-dl.software.informer.com/). Їх використання вимагає від користувача надто великого досвіду використання цих ПЗ та великої мануальної роботи. Вітчизняне ПЗ MCV має достатню точність, але неповнофункціональне і потребує на вході не ПЗЗ-кадри, а заздалегідь обраховані інструментальні блиски змінних зір та зір порівняння. Таким чином, при однаковій точності фотометричних вимірювань ПМЗ CoLiTec значно зручніше для астронома і дозволяє оперативно обробляти спостереження та публікувати їх.

За кордоном проводилися і проводяться активні роботи з пошуку нових технологій, способів і засобів високоточного позиціонування, визначення параметрів руху високодинамічних літальних апаратів, навігації/управління космічних апаратів на заданих навколоземних орбітах. Радіотехнічні і оптичні траєкторні системи входять до складу полігонних вимірювальних комплексів, в інфраструктури космічних комплексів і є засобами високоточного координатно-часового, навігаційного і балістичного забезпечення для вирішення множини задач.

В Україні ж в силу ряду об'єктивних причин, технології в області траєкторних вимірювань ВДЛА практично не розвивалися, хоча для космічних програм були здійснені кілька проектів для траєкторних вимірювань низькоорбітальних КА. У теперішній же час значно зросла

потреба в створенні ефективних ракетних комплексів, як керованих, так і некерованих, для яких необхідні нові високоточні засоби полігонних траєкторних вимірювань. Актуальною є й завдання вимірювань і навігації перспективних спеціалізованих КА України для їх виведення і навігації практично на всіх навколоземних орбітах, включаючи області розривного навігаційного ГНСС на висотах, що перевищують ~2–3 тис. км. Тому задача створення і дослідження перспективної вітчизняної системи і технологій точних визначень параметрів руху ВДЛА/КА, засобів їх незалежного траєкторного контролю в ході льотних випробувань, тестування на полігонах перспективних і сучасних вітчизняних авіаційних, ракетних і космічних комплексів є досить актуальною. Дана розробка відповідає цьому напрямку створення в Україні сучасних точних і ефективних засобів визначення параметрів руху (параметрів траєкторій) КА для відпрацювання систем управління, здійснення їх навігації та управління рухом.

Мета науково-технічного проекту: 1) удосконалення, тестування та впровадження створеного українськими розробниками оригінального ПМЗ CoLiTec в інтересах національної системи контролю космічного простору (СККП) та навколоземної астрономії; 2) створення архітектури та функцій програмно-математичного забезпечення післясеансної обробки спостережень багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань.

Основні завдання науково-технічного проекту:

– впровадження ПМЗ CoLiTec в астрономічних обсерваторіях України, Словаччини та Таїланду, а також в НЦУВКЗ ДКА України для обробки результатів астероїдних ПЗЗ- оглядів, результатів ПЗЗ-спостережень ШСЗ та автоматичної побудови кривих блиску змінних зір;

– проведення та обробка результатів тестових випробувань прототипу ПМЗ БФСТВ з підтвердженням можливості досягнення заданих характеристик точності системи БФСТВ;

Науковий звіт містить 11 розділів та додатки. У розділах 1-7 подано необхідну інформацію щодо принципів розробки, мотивації вдосконалення та результати дослідження програмно-математичного забезпечення CoLiTec, а саме, розглядаються умови спостережень, що впливають на якість зображень небесних об'єктів (розділ 1); принципи модернізації обчислювальних методів сегментації зображень штучних супутників Землі та малих тіл Сонячної системи на астрономічних ПЗЗ-кадрах (розділ 2) та фотометрії небесних об’єктів на серії ПЗЗ кадрів (розділ 3); інші обчислювальні методи та ПМЗ сервісу, обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів обговорюються в розділах 4 і 5 відповідно. Далі науковий звіт містить вичерпну інформацію щодо алгоритмів дослідження показників якості функціонування програми обробки кадрів спостережних оглядів малих тіл Сонячної системи (розділ 6) та штучних супутників Землі (розділ 7). Результати тестування ПМЗ CoLiTec та висновки і рекомендації щодо його застосування подано в розділі 8. Науково-технічне обгрунтування багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ) та функції післясеансної обробки спостережень БФСТВ розглядаються в розділах 9 і 10 відповідно. Розділ 11 містить експериментальні результати тестових випробувань прототипу ПМЗ БФСТВ (обробки спостережень вибраних GPS-супутників з поточного робочого сузір’я) та висновки щодо можливості досягнення заданих характеристик точності системи БФСТВ. Далі у звіті йде перелік посилань на використані літературні джерела та публікації за проектом у 2018 році, включно патенти.

У додатках подається науково-технічна документація, підготовлена в результаті виконання проекту, а саме, керівництво користувача ПМЗ CoLiTec публікації кривих блиску ШСЗ (додаток А1) та служби обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки (додаток А2), копії актів впровадження (додаток А3). Ці самі додатки, документи про реєстрацію авторського права на програмні продукти (додаток Б) та безпосередньо програмні коди ПМЗ CoLiTec (додаток В) подаються окремо в електронному форматі на CD-ROM.

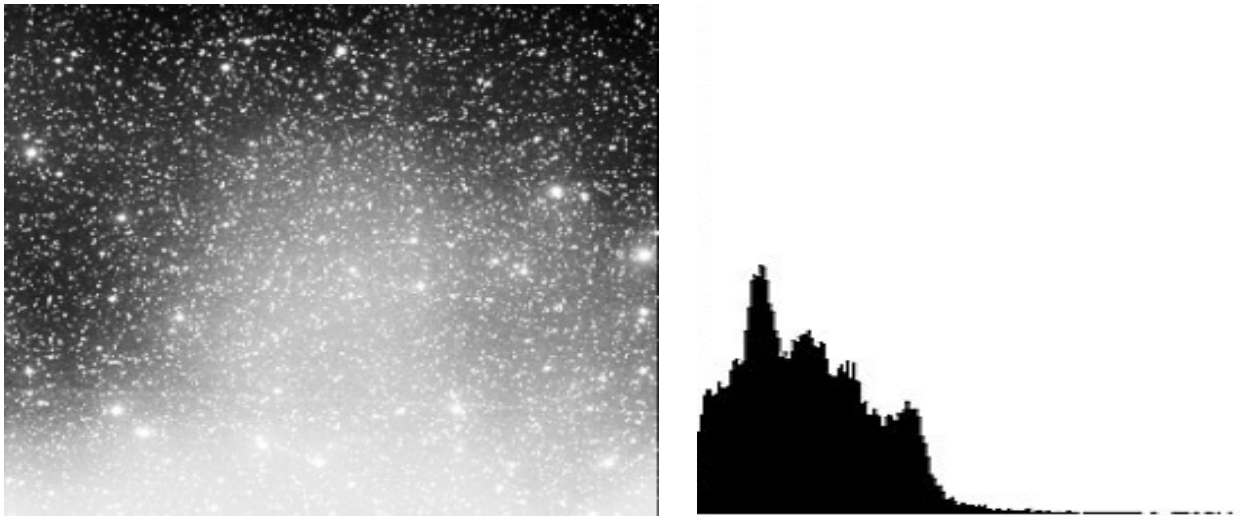
1 ОСОБЛИВОСТІ УМОВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НЕБЕСНИХ ОБЄКТІВ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Оптичні спостереження проводяться з використанням різних видів телескопів - рефракторів, рефлекторів, катадіоптричних телескопів [150]. Більшість вказаних пристроїв оснащена ПЗЗ - камерою [155], реєструючим елементом в якій є матриця із зарядовим зв'язком (Charge Coupled Devices – CCD)[149]. ПЗЗ-приймач є матрицею близько розташованих метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) конденсаторів, які утворюють правильну геометричну структуру.

Однією з характеристик ПЗЗ -матриці є її динамічний діапазон [149, 157]. Динамічний діапазон визначає кількість заряду, який може накопичити кожен елемент матриці. Іноді, при попаданні у поле зору телескопа яскравих об'єктів, відбувається надлишок накопичення заряду, який призводить до перевищення динамічного діапазону. Надмірний заряд перетікає на сусідні осередки і може викликати ефект "розтікання" у зображенунях яскравих зір.

Після завершення процесу спостереження, накопичений заряд зчитується і надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача.

Отримане цифрове зображення можна розділити на великоструктурну і дрібноструктурну складові. Великоструктурна складова відповідає паразитній засвітці зображення [185, 187] від Сонця (при спостереженнях на світанку) і Місяця (особливо коли Місяць повний) (Рис. 1.1.). Наявність засвіток при формуванні цифрового зображення призводить до істотного зростання рівня і неоднорідності фонової підкладки.



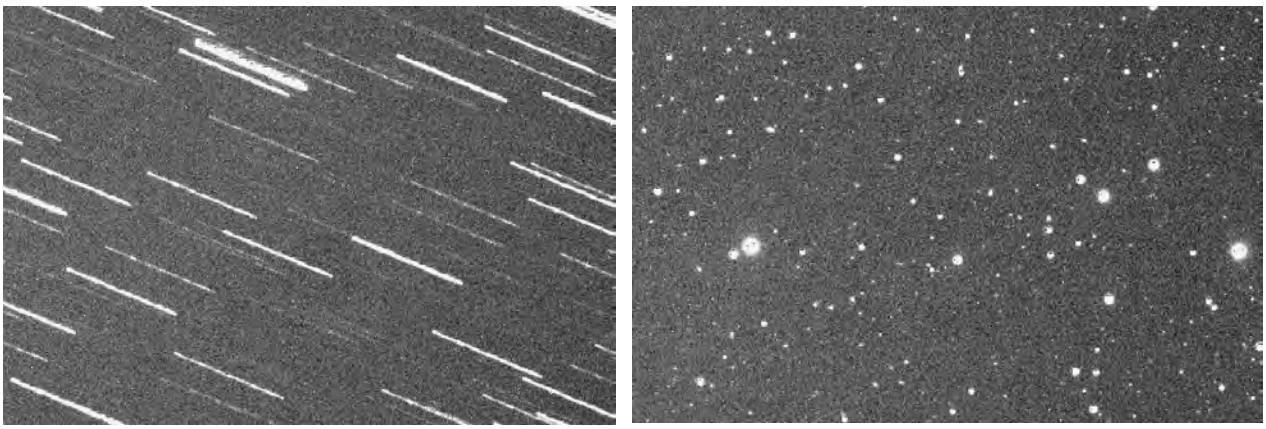
(а) (б)

Рис. 1.1. Цифровий кадр з паразитною засвіткою (а) і його гістограма (б).

Дрібноструктурна складова відповідає зображенням небесних об’єктів (зорі, астероїди, метеори). Розмір зображень об’єктів зазвичай становить 5÷10 і не перевищує 50÷60 пікселів.

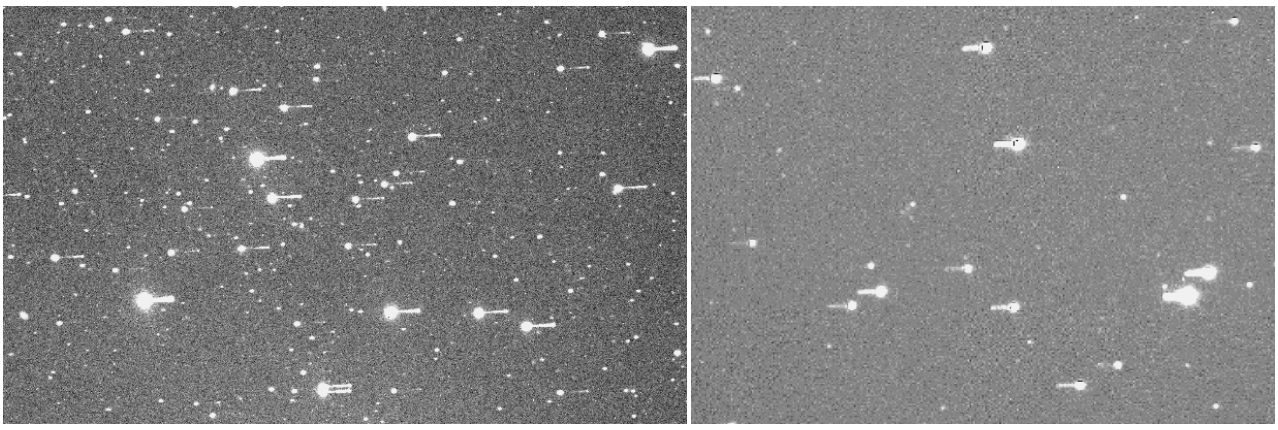
Особливості умов спостереження, які впливають на формування зображень небесних об'єктів на цифрових кадрах. В процесі проведення астрономічних спостережень телескоп найчастіше знаходиться в одному з двох режимів - в нерухомому режимі або в режимі добового ведення [206]. У нерухомому режимі (чи при збою добового ведення) зображення усіх небесних об'єктів на цифровому кадрі змазуються впродовж часу експозиції за рахунок добового обертання Землі (Рис. 1.2а).

У режимі добового ведення монтування телескопа рухається зі швидкістю, компенсуючою добове обертання Землі. У цьому режимі зображення зір являють собою точкові об'єкти (Рис. 1.2б). Метеоявища (дощ, вітер), а також збої в роботі монтування телескопа, призводять до часткового змазування точкових об'єктів (Рис. 1.3.).



а) б)

Рис. 1.2. Цифровий кадр, отриманий з телескопа в нерухомому стані (а) і в стані добового ведення (б)



а) б)

Рис. 1.3. Цифровий кадр, отриманий під час астрономічних спостережень при наявності вітру (а) і часткового збою добового ведення телескопа (б)

Зображення від об'єктів, які рухаються і знаходяться на великих відстанях від Землі (астероїди, комети) нічим не відрізняється від зображення зір. Проте, при тривалій експозиції або при великій швидкості руху об'єкту, який рухається, його зображення змазується за рахунок власного руху. На цифровому кадрі зображення об'єкту, який рухається, має форму пагорба, витягнутого уздовж напрямку його видимого руху (Рис. 1.4.).

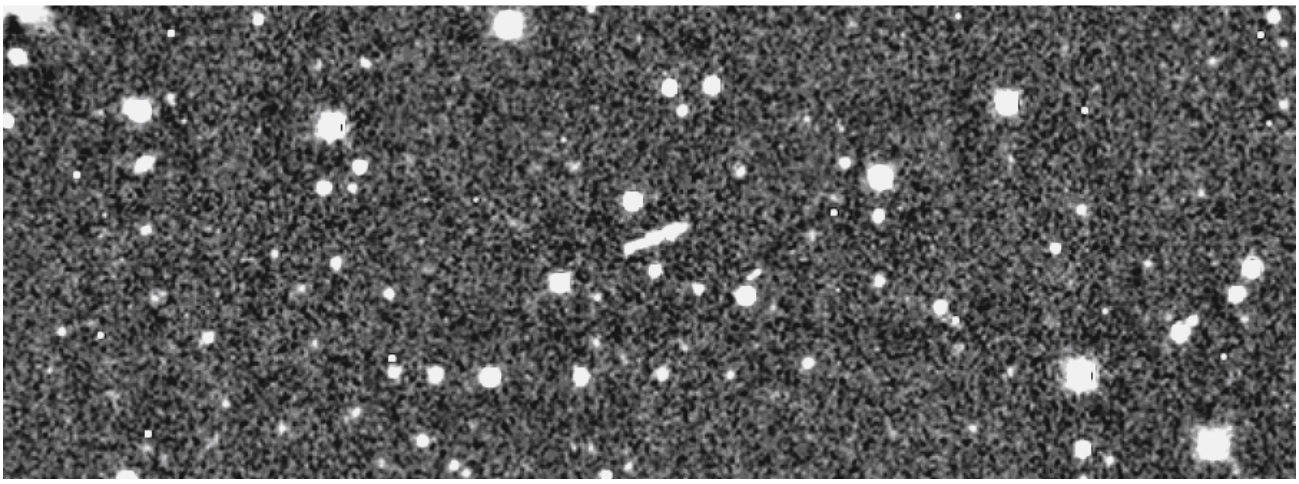


Рис. 1.4. Зображення рухомого об'єкта, змазаного власним рухом.

На відміну від зір, об'єкти Сонячної системи (астероїди, комети) та ШСЗ не є джерелами світла. Випромінювання вказаних об'єктів є відбитим світлом від інших джерел, переважно Сонця [153,154]. У зв'язку з цим, одним із чинників, які визначають яскравість зображень тіл Сонячної системи при спостереженнях, є їх альбедо - характеристика дифузного відображення поверхні тіла [141, 142]. Іншим чинником є їх відстань від Землі. Значне віддалення більшості тіл Сонячної системи від Землі призводить до слабких зображень на цифрових кадрах при будь-якому значенні альбедо [134, 143, 147]. При проходженні випромінювання від небесних об'єктів через атмосферу частина його розсіюється, а частина - поглинається. Те та інше призводить до послаблення [145, 146] і розмиття[134, 136] зображень об'єктів на цифровому кадрі. Крім того, за рахунок присутності в атмосфері аерозолів, частина випромінювання від небесних об'єктів міняє напрям свого розповсюдження, що призводить до додаткового збільшення рівня фонової підкладки [146].

До чинників, які впливають на якість зображення, яке отримується, є також зміщення [134, 135] і розмиття [134, 136] зображення, яке викликане атмосферною турбулентністю [136]. Найбільший вплив роблять турбулентні коливання атмосфери з періодом 0,2 с, які відбуваються в різних напрямках [134]. При значному часі експозиції, зображення точкових об'єктів (зір,

астероїдів) розмиваються на цифровому зображенні [136].

Для телескопів з порівняно невеликим полем зору цифрове зображення області зоряного неба, яке формується, можливо розглядати як центральну проекцію сфери на площину [134, 140]. Проте для більшості сучасних оглядових телескопів з сферичним полем зору реальна проекція відрізняється від ідеальної [152]. Ці відмінності можуть бути характерні як для всіх оптико-механічних систем одного типу, так і бути індивідуальними для конкретної оптичної системи.

Помилки оптичної системи, які викликають відхилення променя від ідеального напрямку [140], називаються оптичною аберацією. Виділяють сім основних видів осе-симетричної аберації [134, 135, 144]: сферична аберація, кома (Рис. 1.5), астигматизм, кривизна поля, дисторсія, хроматизм положення і хроматизм збільшення. Слід зазначити, що з перерахованих аберацій тільки дисторсія [151] визначає помилку в центральній проекції сфери на площину. Інші види аберації впливають на розмиття зображень небесних об'єктів, зміщення в них точки максимальної яскравості.

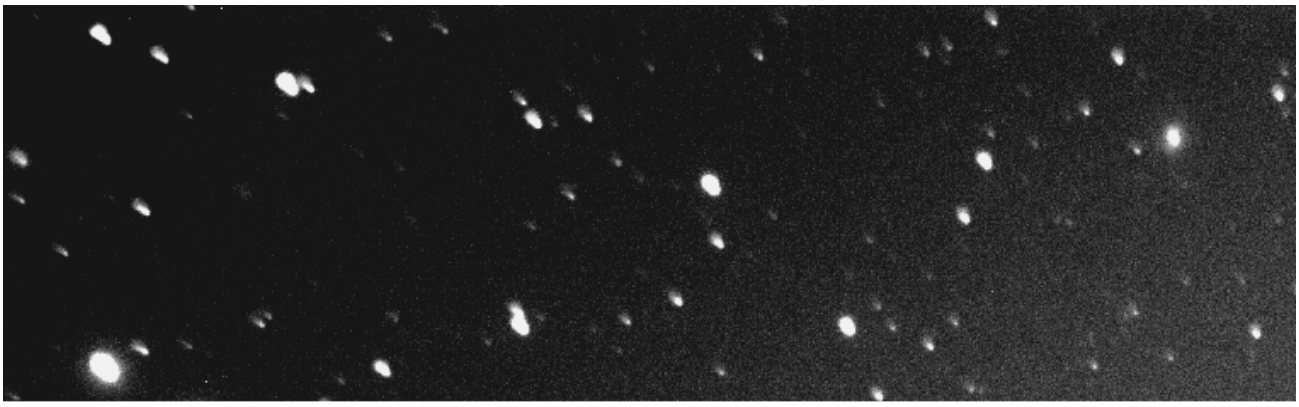


Рис. 1.5. Кома на краю астрономічного зображення

У зв'язку з цим, для добре відцентрованої оптичної системи зміщення в положенні зображень небесних об'єктів на цифровому кадрі залежить тільки від відстані від оптичної осі. Отримане зображення небесних об'єктів на цифровому кадрі можна розглядати як центральну проекцію, яка має деяку узагальнену дисторсію від усієї описаної вище аберації оптичної системи.

Таким чином, особливостями умов формування цифрових кадрів за допомогою телескопа, оснащеного ПЗЗ- матрицею, які впливають на проведення сегментації зображення є:

а) наявність на цифрових кадрах нерівномірно розподіленої фонової підкладки;

б) розтікання зображень яскравих зір при перевищенні динамічного діапазону ПЗЗ - матриці;

в) змазування зображення об'єкту, викликане формуванням цифрового кадру при нерухомому телескопі, збоєм добового ведення, високою швидкістю руху об'єкту;

г) розмиття зображень небесних об'єктів внаслідок впливу турбулентності атмосфери, оптичної аберації;

д) послаблення та розсіювання випромінювання від небесних об'єктів при проходженні через атмосферу;

е) зміщення в положенні зображень небесних об'єктів на цифровому кадрі, викликане дисторсією оптичної системи.

2 МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ТА МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ НА АСТРОНОМІЧНИХ ПЗЗ-КАДРАХ

2.1. Попередній аналіз, завдання і можливі принципи сегментації зображень, які досліджуються.

Попередній аналіз зображень, які досліджуються. Цифровий астрономічний кадр, отриманий в ході астрономічних спостережень, проявляється набором пікселів різної яскравості у визначеному діапазоні можливих значень. Зображення кадра включає в себе фонову підкладку і зображення об’єктів. Зображення небесних об’єктів являє собою пов’язані області, яскравість пікселів яких, перевищує яскравість пікселів фонової підкладки (Рис. 2.1.).

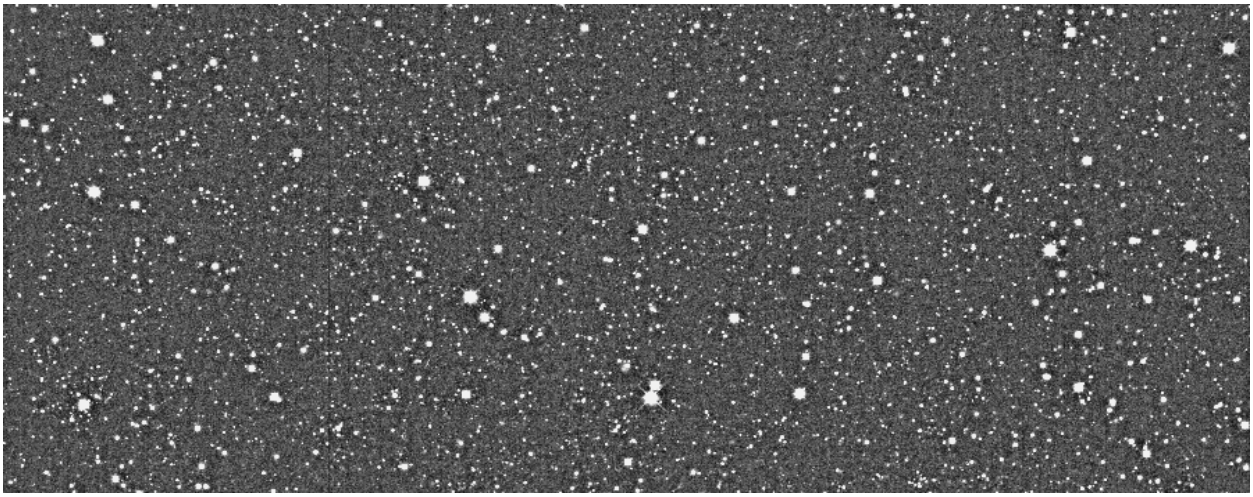


Рис. 2.1. – Цифровий астрономічний кадр

Зображення об’єкта на ПЗЗ-кадрі формується шляхом попадання фотонів від цього об’єкта на пікселі ПЗЗ -матриці [149, 155,157]. Кожний піксел кадра містить потенціал, пропорційний кількості фотонів, які впали на нього. У цьому випадку для спостереження доступні тільки згруповані (об’єднані) події, які пов’язані з попаданням фотонів на піксель під час

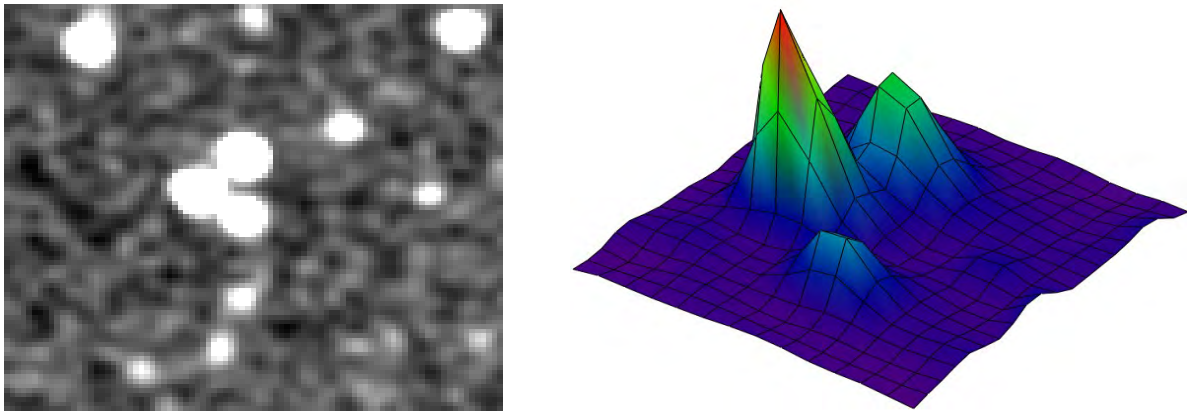
експозиції кадра. Тобто всі події попадання фотонів в точки, які належать пікселю, зливаються у одну подію даного піксела. При цьому, кожний окремий фотон не може бути віднесений до конкретного об'єкту або фону.

У зв'язку з цим на цифровому кадрі можливе перетинання зображень декількох близьких об'єктів – об'єктів із близькими кутовими координатами (Рис. 2.2.). Іншими словами, зображення близьких об'єктів на цифровому кадрі є статично залежною згрупованою вибіркою подій, які полягають у попаданні фотонів на пікселі ПЗЗ -матриці [174, 175]. В даній вибірці кожний окремий фотон не може бути віднесено до конкретного джерелу випромінювання. Йому відповідає тільки піксел, на який він попав.

Рішення про розділення потенціалів (яскравостей) пікселів статично залежних зображень між об'єктами (джерелами випромінювання) приймається на етапі оцінки параметрів місцезнаходження об'єктів на ПЗЗ-кадрі. Проте припускається, що прийняття попереднього рішення про належність пікселя до одного із зображень об'єктів можливе при сегментації. Помилка, допущена при цьому в ході сегментації, є нерезультативною. Пов'язано це з тим, що частіше за все для статистично залежних зображень близьких об'єктів граничні пікселі зображень сусідніх об'єктів є сусідніми пікселями. У свою чергу, на етапі оцінки положення близьких об'єктів на статистично залежних зображеннях виділені сегменти з сусідніми пікселями об'єднуються і в подальшому використовуються спільно [176, 177].

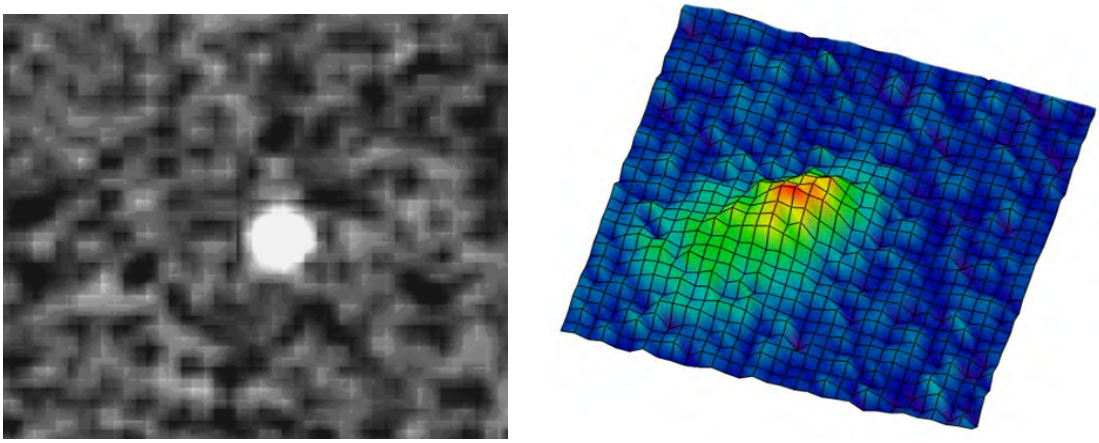
Внаслідок впливу турбулентності атмосфери на формування цифрового кадра, межі сегментованих зображень є розмитими (Рис 2.3.) [54, 55].

На цифровому кадрі також присутні зображення об'єктів, яскравість яких незначно відрізняється від яскравості фонової підкладки. Зображення подібних об'єктів має невеликі значення відношення сигнал/шум (ВСШ) і часто складається з 2-3 пікселів (рисунок 2.4). У даному дослідженні сегментуються зображення об'єктів, в піку (додаток В) яких ВСШ перевищує критичне значення μ_{pbr} (1.3).



а) б)

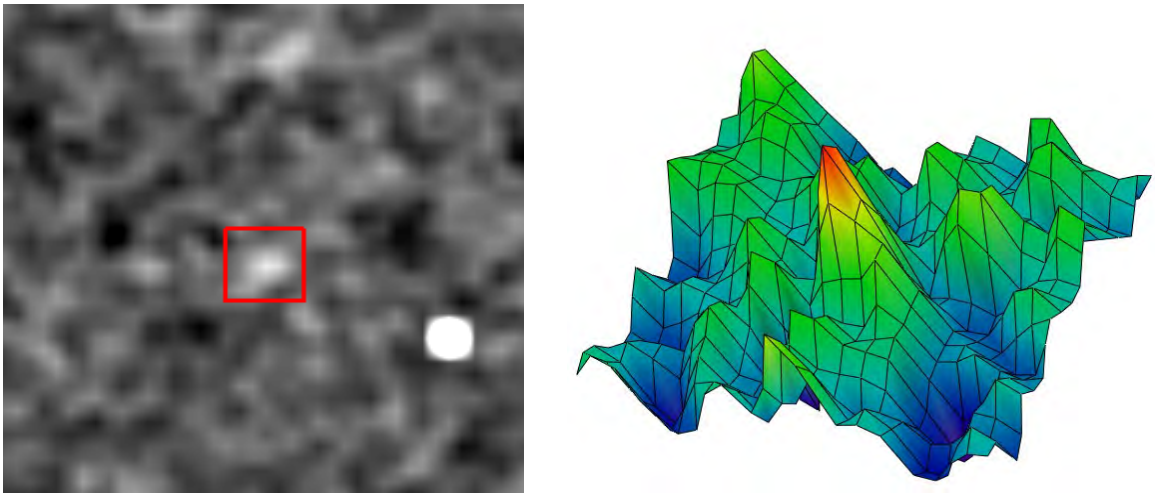
Рис. 2.2. Приклад перетинання зображень близьких об’єктів: а) на цифровому кадрі; б) 3D-представлення



а) б)

Рис. 2.3. Приклад зображення одиничного об’єкта з розмитими межами: а) на цифровому кадрі; б) 3D представлення

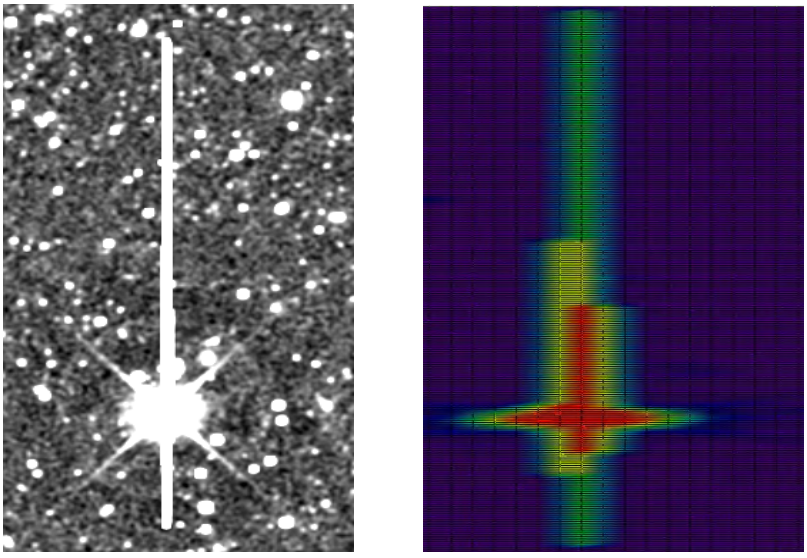
На цифровому кадрі, а також на зображеннях яскравих зір, при тривалих експозиціях можуть мати місце зображення об'єктів, яскравість яких перевищує динамічний діапазон яскравості ПЗЗ- матриці, яка використовується [135, 149, 156, 162].



а) б)

Рис. 2.4. Приклад зображення астероїда: а) на цифровому кадрі (виділений червоним); б) 3D-представлення

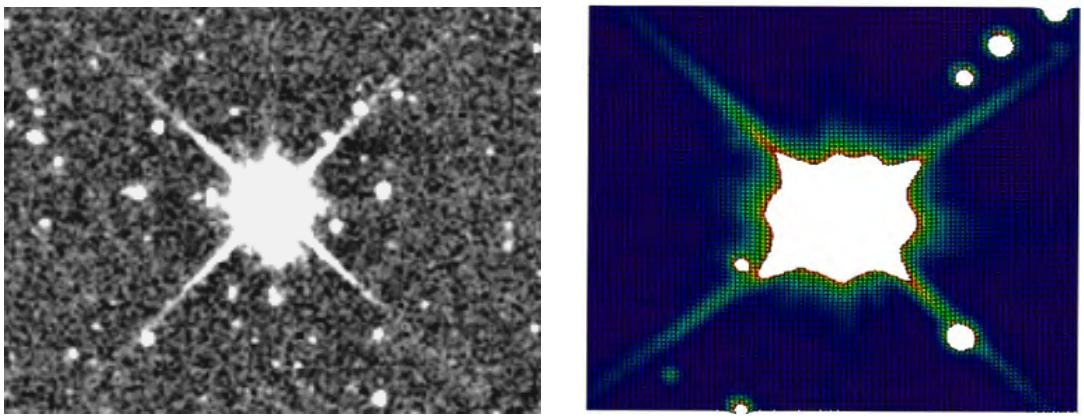
Внаслідок фізичних особливостей ПЗЗ- матриць [157], результуюче зображення подібних об'єктів "розтікається", а їх розміри у декілька разів перевищують розміри зображень інших зір на цифровому кадрі (Рис. 2.5.). "Хвости" (blooming spikes) [156, 162] зображень таких об'єктів можуть перетинатися із зображеннями інших небесних об’єктів.



а) б)

Рис. 2.5. Приклад зображення одиничного об’єкта з «розтіканням» : а) на цифровому кадрі; б) 2D-представлення

Конструктивні особливості оптичних систем телескопів можуть призводити до появи дифракційних променів [160, 161] в зображеньнях небесних об'єктів на цифровому кадрі [156]. Дифракційні промені є лініями, які походять від зображень яскравих зір. Аналогічно до зображень, які "розтеклися", зображення дифракційних променів часто перетинають зображення сусідніх об'єктів (Рис. 2.6.).

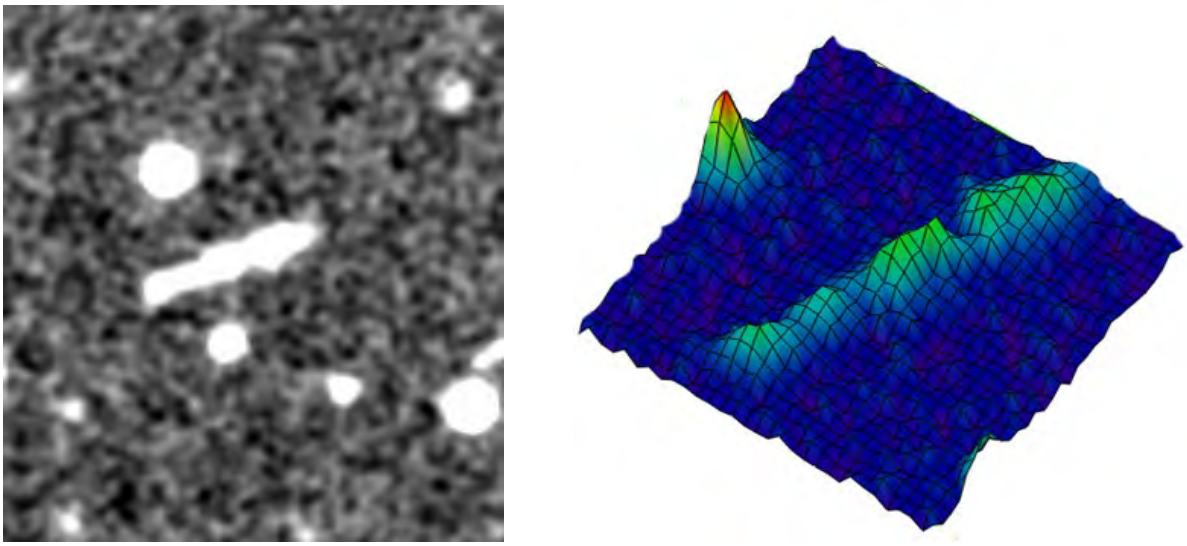


а) б)

Рис. 2.6. Приклад зображення яскравої зорі з дифракційними променями: а) на цифровому кадрі; б) 2D-представлення

У процесі проведення астрономічних спостережень в режимі добового ведення, зображення об'єктів із значним ненульовим видимим рухом (астероїди, метеорити), змазуються за рахунок власного руху (Рис. 2.7а). При проведенні астрономічних спостережень без використання добового ведення, зображення усіх зір на цифровому кадрі змазуються за рахунок власного обертання Землі навколо своєї осі.

У роботі вказані об'єкти називаються об'єктами з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції. На цифровому кадрі зображення цих об'єктів мають форму хребта - пагорба, витягнутого вздовж напрямку їх переміщення на цифровому кадрі (Рис. 2.7б).



а) б)

Рис. 2.7. Приклад зображення об’єкта, з ненульовим видимим рухом: а) на цифровому кадрі; б) 3D представлення

Зображення об'єкта, сформоване об'єктом з ненульовим видимим переміщенням, в роботі називається протяжним (чи витягнутим?) зображенням, а відповідний об'єкт називається протяжним об'єктом. Часто зображення протяжного об'єкту на цифровому кадрі фрагментоване. Яскравість пікселів між фрагментами значно перевищує яскравість пікселів фонової підкладки. При цьому кількість та розмір фрагментів залежить як від умов спостереження (підрозділ 1), так і від шляху, який проходить об'єкт за час експозиції.

Вибір класу методів сегментації. Важливим кроком в розробці процедур сегментації зображень є вибір найбільш підходящого класу методів сегментації. Цей вибір залежить як від типу зображення (кольорове, півтонове, чорно-біле), так і від наявності або відсутності апріорної інформації про об’єкти, які сегментуються.

Астрономічні цифрові зображення є півтоновими. Для попереднього виділення на цифровому кадрі пікселів, які належать зображенням об'єктів, може бути використана порогова обробка (бінаризація) [1, 21, 28]. Проте, фонова підкладка на цифрових астрономічних зображеннях (особливо без

попереднього вирівнювання) нерівномірна. Вказана особливість не дозволяє забезпечити необхідні показники якості сегментації зображень об'єктів. У зв'язку з цим, доцільно використовувати локальне критичне значення яскравості в околі кожного зображення, яке сегментується, замість його глобального аналога.

Існуючі методи сегментації не дозволяють вирішити завдання сегментації астрономічних зображень в описаних умовах. У той же час вважається, що на цифровому кадрі проведено попереднє виділення зображень об'єктів і що виділеним зображенням поставлено у відповідність координати їх піків. Вказана апріорна інформація про координати піків виявлених на зображеннях обґрунтовує розробку методу сегментації з класу методів [170, 171], які використовують ці пики як заздалегідь задані стартові пікселі [33, 172]. Як було зазначено раніше, межі зображень об'єктів, які сегментуються, мають найвищий рівень розмиття. Для проведення сегментації у вказаних умовах найдоцільніше застосувати метод з класу [170, 171] методів сегментації областей [116 ÷ 119]. Даний клас методів заснований на застосуванні послідовності морфологічних операцій [163 ÷ 168] – ерозії, дилатації [169], морфологічній реконструкції [165, 169, 181]. Проте, в умовах, які досліджуються, застосування вказаних морфологічних операцій вимагає попередньої обробки цифрового кадру.

Моделі зображень об’єктів, які використовуються на цифрових кадрах, і ознаки сегментації. Основу методу сегментації, який розробляється, складає надпіксельна модель Гауса [177] зображень об'єктів. Форма зображення об'єкту задається у вигляді двовимірної гаусіани. Яскравість пікселя зображення об'єкту, у рамках надпіксельної моделі, визначається значенням гаусіани у точці з координатами центру пікселя. Максимум гаусіани визначається координатами піка (x_{pj}, y_{pj}). Значення гаусіани спадають від її максимуму до країв. Це дозволяє вважати, що яскравість будь-якого пікселя зображення об'єкту, який досліджується, може тільки зменшуватися при русі від центру гаусіани.

Ґрунтуючись на введеній моделі зображення, компактну групу об'єктів із статистично залежними зображеннями можна подати як об'єднання сукупності двовимірних гаусіан.

Для сукупності двовимірних гаусіан сегментація за заданим критичним значенням яскравості виділяє пікселі, які належать усім зображенням об'єктів, які становлять компактну групу об'єктів із статистично залежними зображеннями. Проте очевидно, що при русі по спуску від максимуму гауссіани настане момент, коли значення яскравості почнуть не спадати, а зростати, переходячи від зображення одного об'єкту до зображення іншого. За рахунок властивості монотонного спадання гаусіани від центру зображення до його країв, зростання яскравості пікселя можна використати як умову виключення пікселя із зображення об'єкту, пік якого є стартовим пікселем сегментації.

Постановка задачі. На типових цифрових кадрах, які досліджується, заздалегідь проведено операцію вирівнювання яскравості [204, 205]. У рамках роботи, зображення об'єктів, які сегментуються на цифровому кадрі, можна розділити на 3 види: одиночні, зображення компактної групи, зображення об'єктів з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції. Розташування і характеристики вказаних зображень об'єктів на цифровому кадрі вважаються невідомими.

Припускається, що оцінки середнього значення і середньоквадратичного відхилення яскравості фонової підкладки відомі (додаток В). Тому можна визначити критичне значення яскравості, при якому, із заданою якістю рішень, що приймаються, піксель вважатиметься таким, який належить зображенню об'єкта, який сегментується, а не фоновій підкладці. Відповідно до вибраного класу методів, сегментація зображення небесного об'єкту розпочинається із заздалегідь визначених координат стартового пікселя (підрозділ 1.3). У рамках методів сегментації, яks розробляються, у якості координат стартового пікселя, пропонується використати координати піку зображення досліджуваного об'єкту. Множина

стартових пікселів (піків) для зображень, які сегментуються, визначається в процесі попереднього виявлення зображень об'єктів (1.3). Для кожного піку зображення об'єкту відомі його координати (x_{pj}, y_{pj}) в системі координат ПЗЗ-кадру.

Вважається, що початкові наближення координат максимумів гауссіан відомі і співпадають із заздалегідь визначеними координатами піків зображень, які сегментуються.

У описаних вище умовах необхідно розробити метод сегментації астрономічних цифрових зображень, який дозволяє сегментувати зображення об'єктів наступного виду:

1. Зображення поодинокого об'єкту, який знаходиться на значній відстані від зображень інших об'єктів (Рис. 2.3.).

2. Витягнуте зображення (наприклад, зображення астероїда, змазане його власним рухом), фрагментоване на сукупність близько-розташованих зображень (Рис. 2.7.). В результаті використання методу сегментації, який розробляється, фрагменти витягнутого зображення мають бути об'єднані в єдине витягнуте зображення.

3. Компактна група статистично залежних зображень близьких об'єктів (Рис. 2.2.). За результатами сегментації компактна група повинна бути заздалегідь розділена на зображення одиночних об'єктів. Вважається, що помилка визначення приналежності пікселів до зображення конкретного об'єкту тої самої компактної групи є нерезультативною. Остаточне рішення про розділення зображень відкладається до процедури оцінки параметрів місця розташування об'єктів на ПЗЗ- кадрі.

4. Зображення яскравих об'єктів, які перетинають зображення сусідніх зір (Рис. 2.6.).

У цьому випадку розмір зображень об'єктів на цифровому кадрі частенько не перевищує 50-60 пікселів (підрозділ 1.2). У зв'язку з цим, замість поступового збільшення розмірів області сегментації, її початковий розмір доцільно задавати в межах вказаних значень.

Суть сукупності методів сегментації зображень об'єктів, які розробляються, на цифровому кадрі. В процесі астрономічних спостережень на цифровому кадрі формуються від сотень до сотень тисяч зображень об'єктів. Сегментація кожного з них має бути проведена з мінімальними помилками.

Згідно з постановкою задачі, на цифровому кадрі можуть бути присутніми зображення об'єктів, відмінні від поодиноких, – зображення компактних груп об'єктів і об'єктів з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції. При цьому, тип зображення, яке сегментується, апріорі не відомий і має бути визначений в процесі сегментації. Сегментація кожного типу зображень часто вимагає проведення додаткових операцій для їх виділення (розділення, об'єднання фрагментів).

З точки зору обчислювальної складності сегментація є трудомістким завданням. У зв'язку з цим, метод сегментації, який розробляється, повинен не лише мінімізувати помилки, але і мати прийнятні (близькі до мінімальних) обчислювальні витрати.

В таблиці 2.1 представлені результати обробки цифрових кадрів, отриманих з трьох різних телескопів: телескопа Genon, VNT і САНТЕЛ-400АН.

Таблиця 2.1. Розподіл типів зображень об’єктів на цифровому кадрі

Телескоп	Розмір кадру (пікселів)	Всього зображень об’єктів	Зображень поодиноких об’єктів	%	Витягнутих зображень і зображень компактних груп	%
САНТЕЛ-400АН	3056x3056	37557	35942	95.7	1615	4.3
VNT	512x512	914	846	92.5	68	7.5
Genon	4008x2672	67093	63127	94.1	3966	5.9

Як показано в табл. 2.1., кількість зображень об'єктів на цифровому кадрі залежить від параметрів оптичної системи і розміру цифрового кадру. В

той самий час, більшість (92% – 96%) зображень об'єктів на цифрових кадрах є поодинокими. Отже, для скорочення загальних витрат сегментації, передусім, необхідно мінімізувати витрати сегментації зображень поодиноких об'єктів.

Для скорочення обчислювальних витрат, в роботі запропонована декомпозиція задачі сегментації зображень об'єктів на цифровому кадрі на задачу послідовної сегментації зображення кожного об'єкта окремо. Після розв’язання вказаної задачі, кожен отриманий сегмент аналізується: чи містить він витягнуте зображення, чи зображення компактної групи об'єктів.

Для зменшення кількості даних, які оброблюються, при сегментації зображень поодиноких об'єктів доцільно використовувати бінарне зображення кадру, який досліджується. Виділення зображень поодиноких об'єктів доцільно проводити з використанням попередньої обробки зображення і послідовності морфологічних операцій, на сформованому бінарному зображенні.

Бінарне зображення, яке використовується для виділення зображень поодиноких об'єктів, не містить інформації про тип зображення об'єктів (поодинокі, зображення компактної групи об'єктів, витягнуті зображення). Для виділення зображень об'єктів, відмінних від поодиноких, необхідно перейти до операцій над півтоновими зображеннями. Проте, для скорочення обчислювальних витрат, ці операції досить проводити тільки в тих сегментах кадру, де заздалегідь на бінарному зображенні виділені зображення поодиноких об'єктів. А при проведенні сегментації зображень поодиноких об'єктів, можна не враховувати відмінності між цими трьома типами зображень: поодиноких об'єктів, об’єктів компактної групи, об'єктів з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції.

Виходячи з властивостей зображень об'єктів компактної групи, розглянутих раніше, одним із параметрів методу сегментації даного типу зображень із урахуванням вказаних особливостей може бути критичне значення приросту яскравості. При русі від піку зображення, яке

сегментується, вказане критичне значення може визначати допустиме зростання яскравості, при якому піксель як і раніше може бути віднесений до даного сегменту зображення (зображення об'єкта, який розглядається).

Зображення небесного об'єкту, з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції, може мати таку ж яскравість, як і небесні об'єкту, які формують компактну групу. Проте, за рахунок переміщення об'єкту впродовж часу експозиції, фотони, які ним випромінюються, розсіюються уздовж напряму його руху, а саме, зображення стає протяжним і фрагментованим. За рахунок цього перепади яскравості між пікселями фрагментів протяжного зображення, у більшості випадків, незначні.

Процес сегментації протяжного зображення в цілому може бути аналогічний сегментації зображень об'єктів компактної групи. Проте, на відміну від зображень компактної групи, витягнуте зображення сильно фрагментоване (розділене на 4 - 7 фрагментів). Під фрагментом розуміємо частину витягнутого зображення, яскравість якого монотонно спадає від піку фрагмента до його країв. Кількість фрагментів, на які розділене витягнутого зображення, невідома. У зв'язку з цим, стартовим пікселям сегментації витягнутого зображення доцільно використовувати виявлений пік кожного фрагмента. Для керування процесом об'єднання суміжних фрагментів зображення в цілісне витягнуте зображення доцільно задати критичне значення допустимого зростання яскравості μ_{fbrsm} ($\mu_{fbrsm} > \mu_{fbr}$), якщо рухатися від стартового (виявленого) піку фрагмента.

В той самий час, виділений на цифровому кадрі пік може належати або зображенню поодинокого об'єкта, або зображенню компактної групи, або фрагменту витягнутого зображення. У зв'язку цим, рішення про тип сегментованого зображення доцільно приймати на підставі аналізу результатів сегментації. Для цього для кожного фрагмента, отриманого по бінарному зображенню, сегментація на півтоновому зображенні проводитиметься двічі: в припущенні, що це витягнуте зображення і що це зображення компактної групи. При цьому, для кожного фрагмента,

отриманого з бінарного зображення, сегментація стартує послідовно з усіх виділених піків, які відповідають фрагментам.

Враховуючи, що перепади яскравості між пікселями сусідніх частин зображення у протяжних зображень менші, ніж в зображеннях компактної групи, вважається доцільно використати наступний підхід.

При сегментації фрагмента, отриманого з бінарного зображення, як зображення компактної групи, може бути використане критичне значення приросту яскравості μ_{fbr}. При цьому в процесі сегментації до витягнутого зображення будуть віднесені пікселі стартового фрагмента (отриманого з бінарного зображення), а також незначна частина пікселів, які належать сусіднім фрагментам.

При сегментації фрагмента, отриманого з бінарного зображення, як витягнутого зображення, буде зроблена спроба об'єднання суміжних фрагментів в цілісне витягнуте зображення. Для керування процесом об'єднання може бути використане критичне значення допустимого зростання яскравості μ_{fbrsm} ($\mu_{fbrsm} > \mu_{fbr}$). Об'єднання сусідніх фрагментів виконається, якщо сусідні граничні пікселі сусідніх фрагментів мають перепади яскравості, які не перевищують критичне значення μ_{fbrsm}. Таким чином, при незначних перепадах яскравості між фрагментами зображення до стартового фрагмента приєднуються пікселі деяких фрагментів, які входять в єдиний фрагмент, отриманий з бінарного зображення.

Отримані в результаті сегментації зображення (витягнуте і компактної групи) об'єкту матимуть різну кількість віднесених до них пікселів. Якщо зображення, яке сегментується, є витягнутим, то кількість пікселів сегменту, отриманого в припущенні про наявність витягнутого зображення, більша, ніж кількість пікселів сегменту, отриманого в припущенні про наявність зображення компактної групи.

Різниця між кількістю пікселів сегменту, отриманого в припущенні про наявність витягнутого зображення і отриманого в припущенні про наявність

зображення компактної групи, залежить від розмірів зображення об'єкту на цифровому кадрі.

В зв’язку з цим, вводиться відношення l_{nbsm} між кількістю пікселів в сегменті, які отримано в припущеннях про зображення компактної групи і отриманому в припущенні про витягнуте зображення, сегментованих тим самим стартовим піком/пікселем.

В роботі значення відношення кількості пікселів l_{nbsm}, яке перевищує наперед задане критичне значення, буде використано в якості ознаки сегментації витягнутого зображення.

Остаточне рішення про виділення витягнутого зображення приймається при подальшій обробці з використанням методу виділення зображень об'єктів, з ненульовим видимим переміщенням впродовж часу експозиції [180].

2.2. Обчислювальний метод сегментації зображень поодиноких об'єктів на цифрових зображеннях з попереднім виділенням стартових пікселів.

У цьому підрозділі описано метод сегментації з класу методів із стартовим пікселем. Моделі зображень об'єктів, які використовуються, і суть методу сегментації, який розробляється, розглянуті в підрозділі 2.1.

Попередня обробка цифрового кадра. Для зменшення кількості неправдивих піків, перед початком сегментації зображень об'єктів доцільно проводити попередню обробку цифрового кадру з використанням згладжуючого цифрового фільтру низьких частот [1, 2, 157, 183]:

$$A_{fik} = \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{l=1}^{n_m} M_p(m,l) A_s(i-m, k-l); \qquad (2.1)$$

де $A_s(i-m, k-l)$ - яскравість ik-го пікселя вихідного (не відфільтрованого) цифрового кадра;

A_{fik} - яскравість ik-го пікселя відфільтрованого цифрового кадра;

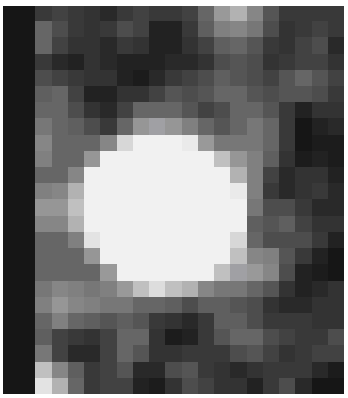
M_p - квадратна матриця розмиття з розміром $n_m x n_m$;

m,l - індекси елементів матриці розмиття, $m = \overline{-n_m, n_m}, l = \overline{-n_m, n_m}$.

При проведенні досліджень, в якості згладжуючого фільтру використовувався низькочастотний фільтр Гауса.

Область сегментації зображення об'єкта. Відповідно до вибраного класу методів, сегментація зображень об'єктів на цифровому кадрі розпочинається із попередньо визначених стартових пікселів. Стартовим пікселем сегментації j-го зображення об’єкту визначається пік даного зображення, який характеризується координатами (x_{pj}, y_{pj}).

Відповідно до умов спостереження (підрозділ 1) розміри більшості зображень об'єктів на цифровому кадрі вважаються такими, які не перевищують заздалегідь відомих граничних розмірів. У зв'язку з цим, в околі заданих координат піку зображення j-го об’єкта (x_{pj}, y_{pj}) формується прямокутна область Ω_{imgj} сегментації з кутовими розмірами R_{cx}, R_{cy} (Рис. 2.9.). Ці розміри задаються з припущень про розмір зображень об'єктів на досліджуваному типі цифрових кадрів і вони однакові для усіх зображень гіпотетичних об'єктів, які сегментуються.



3390, 3396, 3401, 3408, 3404, 3394, 3405, 3417, 3407, 3397, 3397, 3398, 3400, 3404, 3397
3391, 3394, 3392, 3396, 3393, 3394, 3409, 3418, 3410, 3396, 3394, 3398, 3408, 3415, 3403
3377, 3381, 3388, 3391, 3392, 3408, 3431, 3440, 3428, 3406, 3397, 3396, 3406, 3411, 3397
3362, 3369, 3381, 3393, 3418, 3467, 3534, 3564, 3520, 3455, 3416, 3398, 3401, 3405, 3388
3362, 3364, 3374, 3409, 3481, 3634, 3882, 4021, 3889, 3651, 3491, 3420, 3406, 3402, 3384
3367, 3377, 3393, 3450, 3605, 4047, 4825, 5331, 4984, 4207, 3679, 3478, 3422, 3400, 3387
3370, 3392, 3417, 3490, 3767, 4669, 6396, 7713, 7082, 5266, 3996, 3554, 3442, 3397, 3383
3378, 3396, 3423, 3515, 3867, 5054, 7537, 9761, 9153, 6412, 4341, 3620, 3451, 3396, 3373
3385, 3392, 3415, 3504, 3808, 4815, 7067, 9392, 9175, 6584, 4419, 3632, 3442, 3389, 3367
3382, 3383, 3405, 3462, 3641, 4206, 5481, 6933, 6989, 5491, 4112, 3572, 3428, 3382, 3365
3383, 3375, 3393, 3422, 3499, 3725, 4178, 4701, 4762, 4248, 3726, 3488, 3413, 3388, 3374
3396, 3382, 3384, 3401, 3435, 3506, 3617, 3733, 3749, 3639, 3514, 3436, 3399, 3390, 3388
3397, 3397, 3391, 3400, 3416, 3433, 3460, 3476, 3468, 3448, 3436, 3423, 3400, 3386, 3389
3385, 3396, 3399, 3402, 3406, 3405, 3405, 3401, 3390, 3392, 3414, 3420, 3398, 3380, 3382
3380, 3385, 3393, 3394, 3388, 3377, 3373, 3382, 3383, 3382, 3403, 3409, 3384, 3368, 3374

а) б)

Рис. 2.9. Зображення області сегментування. а) на цифровому зображенні; б) у вигляді значення яскравості пікселів.

У цьому випадку межею області сегментації є множина пікселів першого і останнього стовпця, а також першого і останнього рядка цієї області [1, 2]. У свою чергу, координати будь-якого пікселя на межі можна виразити через координати $(x_{0j} = x_{pj}, y_{0j} = y_{pj})$ центра області сегментування j-го зображення об'єкта Ω_{imgj} і розмір області (R_{cxj}, R_{cyj}) по осях абсцис і ординат відповідно (Рис. 2.10.):

$$x_{bj} = x_{0j} - \frac{R_{cxj}}{2},\ x_{ej} = x_{0j} + \frac{R_{cxj}}{2}; \tag{2.2}$$

$$y_{bj} = y_{0j} - \frac{R_{cyj}}{2},\ x_{ei} = x_{0j} + \frac{R_{cxj}}{2}, \tag{2.3}$$

де x_{bj}, x_{ej} – координати лівої і правої межі області сегментування зображення об'єкта по осі абсцис відповідно;

y_{bj}, y_{ej} – координати верхньої і нижньої межі області сегментування зображення об'єкта по осі ординат відповідно.

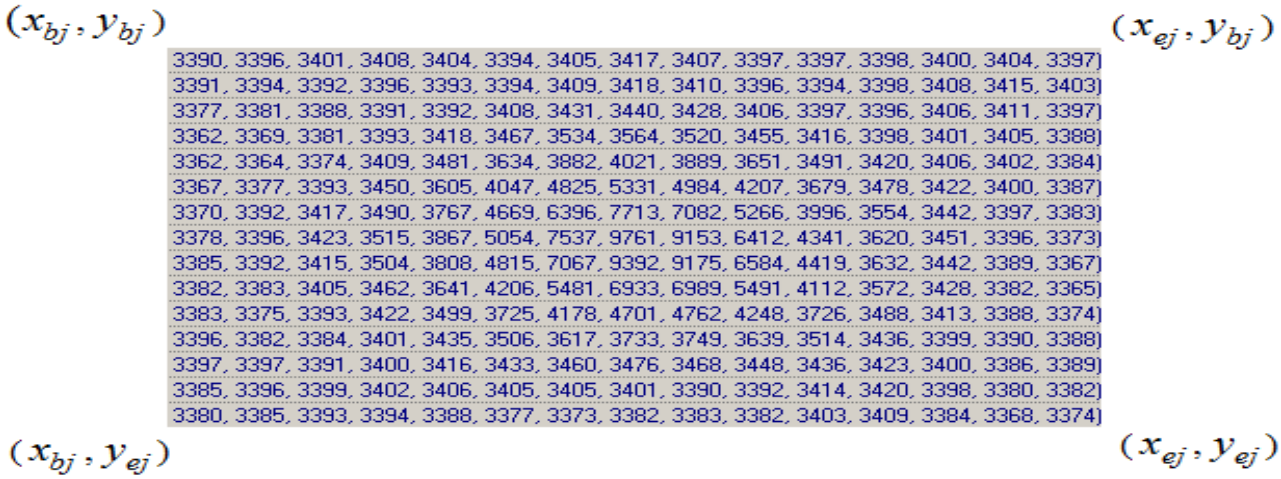


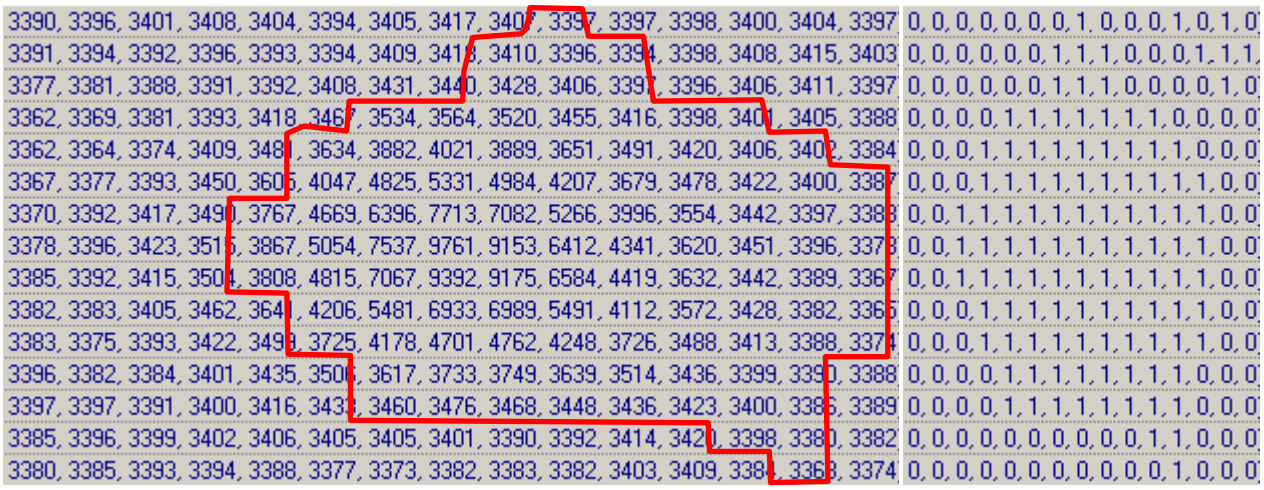
Рис. 2.10. Координати меж області сегментування Ω_{imgj}.

Формування бінарного зображення. Проведення бінаризації значно зменшує кількість інформації, яка обробляється, і обчислювальні витрати запропонованого методу сегментації зображень об'єктів.

Головним параметром перетворення вихідного зображення області сегментації Ω_{imgj} в бінарне зображення області $\Omega_{binimgj}$ є граничний коефіцієнт відбору пікселів k_c. Одиницями у бінарному зображенні заповнюються пікселі, яскравість яких задовольняє правило перетворення вихідного зображення у бінарний формат (правило бінаризації) (Рис. 2.11.) :

$$A_{ik} > k_c \cdot \sigma_{noi} + \hat{\Delta}_{noi}, \tag{2.4}$$

де A_{ik} - яскравість ik-го пікселя цифрового кадра; σ_{noi} - оцінка середньоквадратичного відхилення (СКВ) яскравості фонової підкладки; $\hat{\Delta}_{noi}$ - оцінка середнього значення яскравості пікселів фонової підкладки.



а) б)

Рис. 2.11. Вихідне зображення (а) і результат його бінаризації (б).

На Рис. 2.11.(а) червоним позначена область із пікселів, які віднесено, відповідно до правила бінаризації (2.4), до передбачуваного зображення об'єкту. Ефективність бінаризації зображення з нерівномірним фоном визначається також точністю оцінки параметрів фону в околі зображення об'єкту, який сегментується. У нашій роботі, в якості оцінки середньоквадратичного відхилення значень яскравості пікселів фонової

підкладки σ_{noi}, використовується оцінка СКВ яскравості пікселів фонової підкладки l-го фрагмента цифрового кадра ($\sigma_{noi} = \sigma_{noil}$), якому належать координати піка зображення j-го об'єкта (x_{pj}, y_{pj}) (додаток В). Яскравість пікселів фонової підкладки може мінятися від фрагмента до фрагмента. У той же час, як показують дослідження, у межах фрагмента кадру значення яскравості пікселів фонової підкладки залишаються приблизно однаковими. Це дозволяє провести адаптивну бінаризацію для кожної області Ω_{imgj}. У цьому виппадку значення граничного коефіцієнта k_c у виразі (2.4) задається один раз для всього зображення.

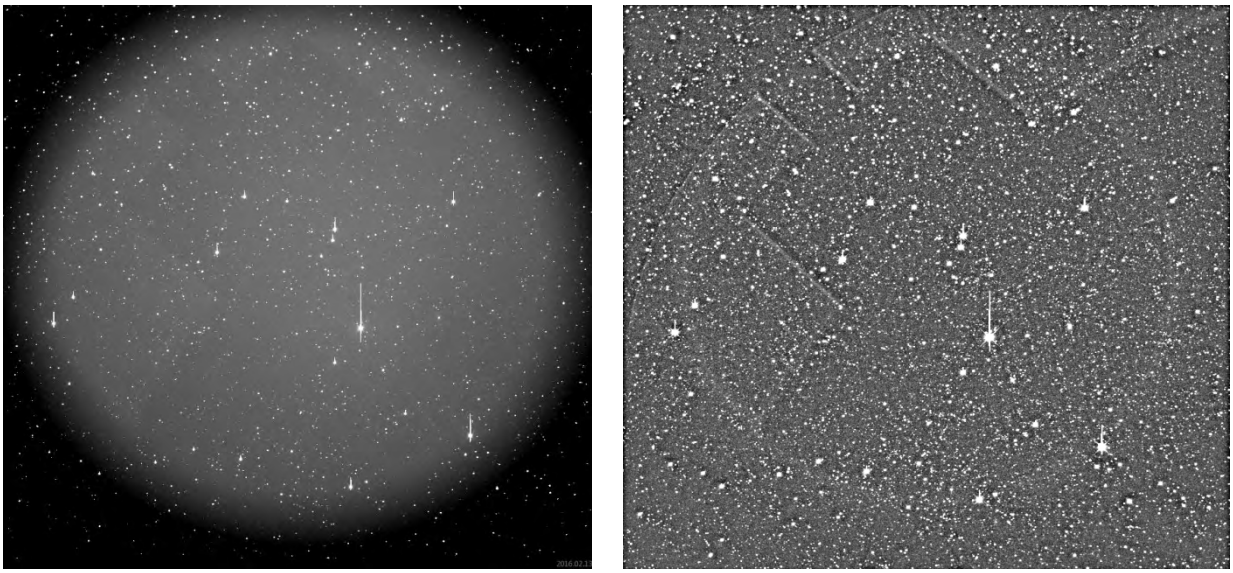
Наявність на цифровому зображенні великої кількості зображень яскравих зір негативно впливає на точність оцінки параметрів фонової підкладки при розділенні цифрового кадру на фрагменти.

З одного боку, для точнішої оцінки параметрів фонової підкладки фрагмента зображення доцільно зменшити розмір фрагментів, щоби виключити вплив засвіток від зображень яскравих зір. З іншого боку, при зменшенні розміру фрагментів з'являється небезпека, що зображення об'єктів, які сегментуються (розміри яких апріорі невідомі). перевищать розміри фрагментів, до яких вони належать. Це приведе до завищеної оцінки параметрів фонової підкладки і пропуску пікселів зображення при бінаризації (2.4).

Вибір кількості і розміру фрагментів визначається багатьма чинниками. До них відносяться характеристики ПЗЗ- матриці, яка використовується, режим роботи телескопа, припущення про розміри і щільність зображень небесних об'єктів на цифрових кадрах, які отримуються.

Проте, в режимі автоматичної зйомки цифрові кадри можуть бути отримані з різних ділянок неба. Розподіл зображень об'єктів і площа, яку вони займають на цифровому кадрі, можуть відрізнятися від кадру до кадру. У цих умовах, доцільно проводити вирівнювання яскравості фону цифрового зображення (Рис. 2.12.).

При використанні вирівнювання яскравості фону параметри фонової підкладки з прийнятною для практики точністю можна вважати однаковими на усьому цифровому кадрі. Іншими словами, у виразі (2.4) можна використати оцінку параметрів глобальної фонової підкладки (додаток В). Це дозволить уникнути завищеної оцінки параметрів фонової підкладки в окремих фрагментах кадру.



а) б)

Рис. 2.12. Цифровий астрономічний кадр до (а) і після (б) вирівнювання яскравості фону.

Особливості бінарного зображення області сегментації і його морфологічна обробка. Яскравість пікселів зображень об'єктів, як правило, перевищує яскравість фонової підкладки. На сформованому бінарному зображенні області сегментації j-го зображення об’єкта $\Omega_{binimgj}$ пікселі з яскравістю, яка перевищує задану, відмічені одиницями (Рис. 2.13). Зрозуміло, що зображення j-го об’єкта, яке сегментується, є позв’язною областю [1, 2]. Іншими словами, зображення j-го об’єкта, який сегментується, є множиною пікселів, між будь-якими двома з яких існує шлях, тобто існує послідовність пікселів, яка не повторюється, зі значеннями яскравості $A_{ik} = 1$, також належних до даної області [1, 164, 165].

Рис. 2.13. Бінарне зображення області сегментування Ω_{binimg_j}.

За рахунок ряду чинників, включаючи апріорне завдання розмірів області сегментації, її бінарне зображення $\Omega_{binimgj}$ може містити пікселі, які не належать зображенню j-го об’єкта, який сегментується. У зображення цієї області також можуть увійти пікселі, які належать зображенням сусідніх зір цифрового кадру (на Рис, 2.13. позначені жовтим кольором).

На зображенні також часто присутні паразитні лінії та інші артефакти [169, 170], які іноді порушують форму зображення, яке сегментується (на Рис. 2.13. позначені червоним кольором). Найчастіше їх розміри не перевищують декількох пікселів. Для простоти подальшого пояснення, пікселі, які порушують форму зображення, яке сегментується, називаються паразитними. Наявність паразитних пікселів на бінарному зображенні області сегментації приведе до невиправданого розширення сегментованого зображення об'єкту.

Для виключення паразитних пікселів в обробці бінарних зображень доцільно використати операцію розмикання [1, 163, 170]. У загальному випадку, операція розмикання видаляє паразитні лінії та інші артефакти, товщина яких менша, ніж структуроутворюючий елемент, який використовується. B_{srt}. Операція розмикання виконується шляхом послідовного проведення операцій ерозії і дилатації з тим самим

структуроутворюючим елементом. Відповідно до теорії великих множин, операція розмикання бінарного зображення $\Omega_{binimgj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} задається виразом:

$$\Omega_{binimgj} \circ B_{srt} = (\Omega_{binimgj} - B_{srt}) \oplus B_{srt}. \quad (2.5)$$

У області сегментації можуть бути присутніми пікселі, які належать зображенням сусідніх зір (на Рис. 2.13. позначені жовтим кольором). У ряді випадків, проведення операції ерозії не виключить ці пікселі із зображення бінарної області сегментації $\Omega_{binimgj}$. У зв'язку з цим, перед операцією дилатації доцільно проводити операцію морфологічної реконструкції [165, 169, 181] зображення бінарної області сегментації $\Omega_{binimgj}$. Це дозволить виключити із $\Omega_{binimgj}$ усі елементи зображення, які становлять окремі локальні області поодиноких пікселів, не приєднані до зображення j-го об’єкта, яке сегментується, і які не належать йому.

Слід зазначити, що сегментація проводиться послідовно для усіх областей сегментації. У кожній області сегментації виділяється тільки один сегмент. Центр сегменту співпадає з центром області сегментації і одночасно є піком зображення об'єкту, який сегментується. У зв'язку з цим, операція морфологічної реконструкції зводиться до операції виділення пов'язаних компонент [1, 165]. Стартовим пікселем для проведення операції морфологічної реконструкції є пік зображення j-го об’єкта, який сегментується, з координатами (x_{pj}, y_{pj}). В результаті вказаної операції формується реконструйоване бінарне зображення $\Omega_{binrecj}$ ($\Omega_{binrecj} \subseteq \Omega_{binimgj}$), на якому залишаються пікселі із значеннями яскравості $A_{ik} = 1$, пов’язані з піком зображення, яке сегментується. Таким чином, операція розмикання (2.5) з морфологічною реконструкцією (розмикання реконструкцією), яка додатково проводиться [1, 167, 168] визначається виразом:

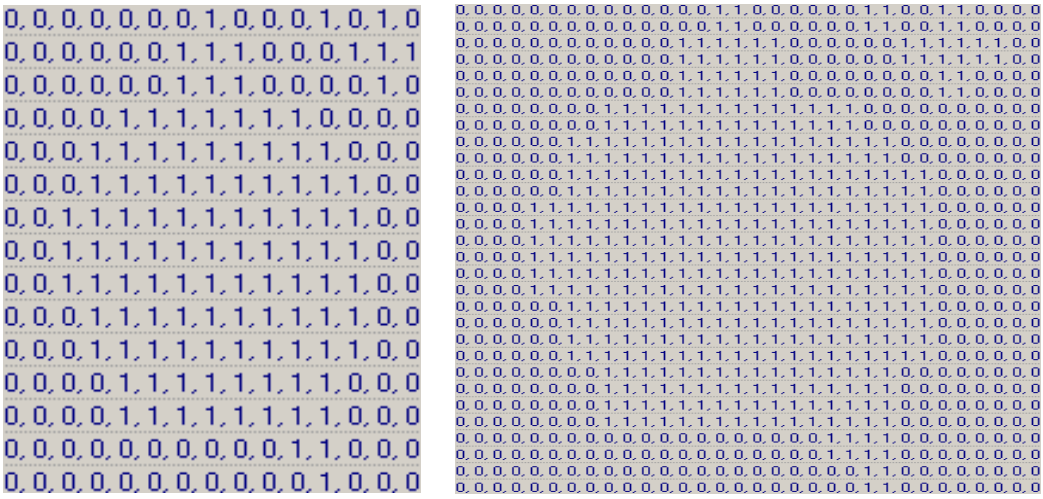
$$\Omega_{binimgj} \circ B_{srt} = (\Omega_{binrecj} - B_{srt}) \oplus B_{srt}. \quad (2.6)$$

Масштабування бінарного зображення. За інших рівних умов розмір зображення об'єкту на цифровому кадрі визначається видимою яскравістю його джерела. Яскравість зображення зір з великою зоряною величиною значно перевищує яскравість фонової підкладки, що сприяє надійній сегментації зображення таких об'єктів. В той самий час, зображення об'єктів із слабким блиском (комети, астероїди) мають низьке відношення сигнал/шум. За результатами бінаризації (2.4), кількість пікселів у зображенні буде мала (3 - 5 пікселів). Зображення об'єкту з такою малою кількістю пікселів складається тільки із пікселів його межі, і не містить пікселів, які складають його внутрішню область. Дана особливість не дозволяє використовувати морфологічні операції для сегментації зображень об'єктів з такою малою кількістю пікселів.

Виникає протиріччя між необхідністю сегментації зображень із слабким блиском і доцільністю використання морфологічних операцій в процесі сегментації. Очевидним шляхом його вирішення, є використання двох методів сегментації – одного для зображень об'єктів із слабким блиском, іншого для зображень інших об'єктів на цифровому кадрі. Проте, відповідно до постановки задачі, вважається, що на етапі сегментації відсутня будь-яка апріорна інформація про наявність і розташування зображень об'єктів із слабким блиском на цифровому кадрі. У зв'язку з цим, використання двох методів сегментації є неможливим.

Для можливості сегментації зображень об'єктів з малою і великою кількістю пікселів одним методом, доцільно модифікувати зображення виділеної області шляхом його масштабування із заданим коефіцієнтом μ_{sc} [1, 2, 15]. Проведена операція бінаризації (2.4) дозволяє уникнути труднощів, пов'язаних із спотворенням зображення [1, 33, 34] в процесі масштабування. З існуючих методів масштабування [33, 35, 36], для бінарного зображення

доцільне застосування методу найближчого сусіда [33] (Рис. 2.14.). Проведення масштабування змінює розмір зображення об'єкту, який сегментується. При збільшенні розміру зображення [178, 179], результуюче зображення формується шляхом копіювання μ_{sc} - разів кожного пікселя вихідного зображення (Рис. 2.15а).

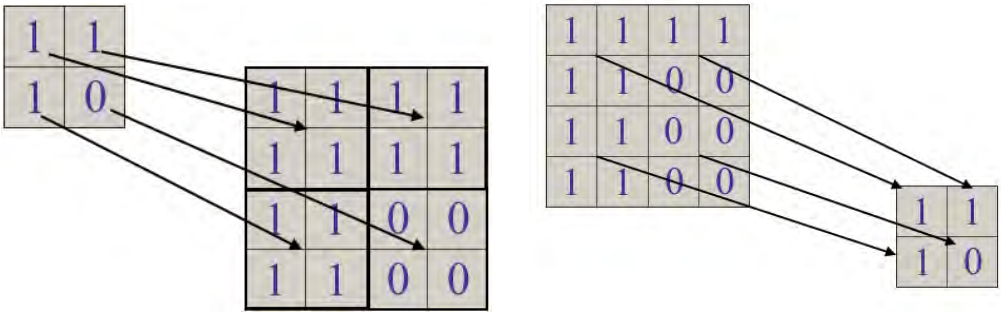


а) б)

Рис. 2.14. Операція масштабування бінарного зображення:
а – вихідне зображення; б – результат масштабування.

В рамках операції зменшення розміру зображення кожні μ_{sc} пікселів вихідного зображення формують єдиний піксель в результуючому зображенні (Рис. 2.15б). При цьому, якщо значення хоч би одного з μ_{sc} пікселів вихідного зображення було рівним одиниці, значення результуючого пікселя буде дорівнювати одиниці.

Швидкість виконання масштабування залежить тільки від розмірів кінцевого зображення і не вимагає проведення затратних обчислювальних операцій над числами з плаваючою точкою.



а) б)

Рис. 2.15. – Операція збільшення (а) і зменшення (б) розміру зображення при масштабуванні бінарного зображення.

Розширення бінарного зображення області сегментації. Велика частина зображень небесних об'єктів має розмір, який не перевищує заздалегідь відомого граничного розміру, заданого виходячи з досліджень зображень об'єктів на даному типі цифрових кадрів. Проте, так буває не завжди. У таблицях 2, 3 показані розподіли розміру і кількості пікселів у зображеннях об'єктів на цифрових кадрах, отриманих з використанням трьох різних телескопів: телескопа VNT, Genon і САНТЕЛ-400АН. Для кожного телескопа на рисунках 2.17. – 2.22. показані гістограми розмірів зображень об'єктів на цифрових кадрах. Кількість і розмір зображень об'єктів на цифровому кадрі (Рис. 2.16.) залежить від фокусної відстані, поля зору телескопа і масштабу пікселя.

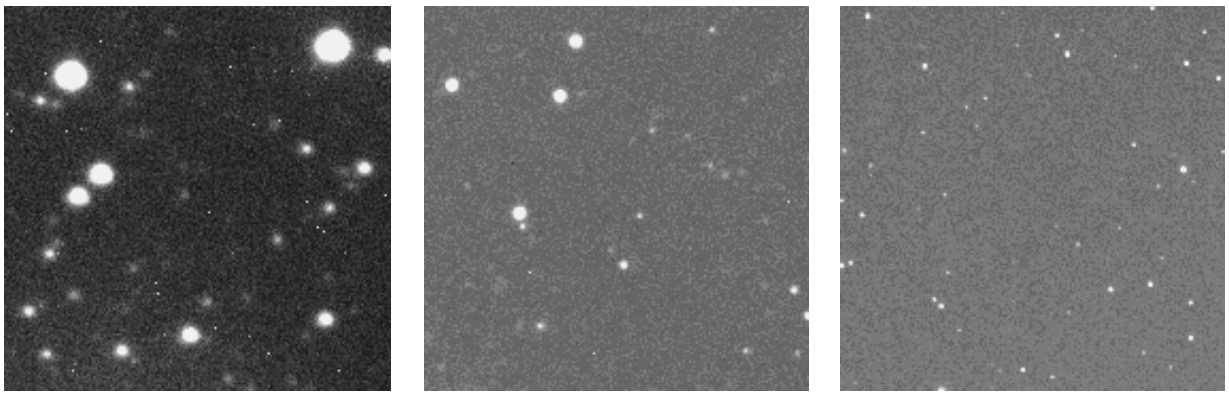
Таблиця 2.2. Розміри зображень об’єктів на цифрових кадрах

	Телескоп		
	САНТЕЛ-400АН	VNT	Genon
Розмір цифрового кадру (пікс.)	4008x2672	512x512	3056x3056
Розмір зображень об’єктів (пікс.)	Кількість зображень об’єктів		
[2]	6587	123	13039
(2 – 4]	16654	374	34681
(4 – 6]	7420	115	12910

(6 – 8]	3848	99	4274
(8 – 10]	1825	86	1516
(10 – 12]	772	38	471
(12 – 14]	459	29	265
(14 – 16]	280	26	201
(16 – 18]	168	15	140
(18 – 20]	111	13	107
(20 – 22]	48	10	44
(22 – 24]	45	4	36
(24-26]	41	5	46
>26	156	8	186

Таблиця 2.3. Кількість пікселів в зображеннях об’єктів на цифрових кадрах

	Телескоп		
	САНТЕЛ-400АН	VNT	Genon
Розмір цифрового кадру (пікс.)	4008x2672	512x512	3056x3056
Кількість пікселів	Кількість зображень об’єктів		
[20]	23207	496	46025
(20 - 40]	7523	127	15041
(40 - 60]	3434	74	3972
(60 - 80]	1600	65	1280
(80 - 100]	858	46	562
(100 - 120]	466	22	287
(120 - 140]	331	17	172
(140 - 160]	213	13	121
(160 - 180]	163	21	79
(180 - 200]	99	6	81
(200 - 220]	58	9	47
(220 - 240]	54	8	50
(240 - 260]	38	7	38
(260 - 280]	33	7	31
>280	337	26	130



а) б) в)

Рис. 2.16. Цифрові кадри, отримані з використанням різних телескопів: а) VNT б) САНТЕЛ-400АН в) Genon

Основними параметрами, які впливають на розмір зображень об'єктів, яке отримуються, є фокусна відстань f [135, 155, 157], апертура [155, 159, 187], фізичні характеристики ПЗЗ- матриці, яка використовується [159, 185, 188] – розміри матриці і фізичні розміри пікселя матриці. Більше значення фокусної відстані збільшує розмір зображень об'єктів, які формуються у фокальній площині [135, 155, 159]. При однаковій апертурі, кількість об'єктів, які формуються на цифровому кадрі, повністю залежатиме від розміру чутливої області ПЗЗ- матриці телескопа.

Отже, вибір розмірів області сегментації доцільно проводити виходячи як з особливостей конкретної оптичної системи, так і з характеристик ПЗЗ-матриці, яка використовується. Так, для цифрових кадрів, отриманих з використанням телескопа VNT, розмір області сегментації доцільно задавати рівним $R_{cx} = R_{cy} = 20$ (Рис. 2.17., 2.18.). Розмір 95% зображень об'єктів на цифровому кадрі, отриманому з використанням телескопа Genon, не перевищує 8 пікселів (Рис. 2.19., 2.20.). Отже, цей розмір найдоцільніше задавати у якості розмірів області сегментації $R_{cx} = R_{cy} = 8$.

Згідно з гістограмами, показаними на рисунках 2.21, 2.22, для телескопа САНТЕЛ-400АН розмір області сегментації доцільно вибирати рівним $R_{cx} = R_{cy} = 10$. Цей розмір дозволяє сегментувати більше 96%

зображень об'єктів з використанням наперед заданого розміру області сегментації.

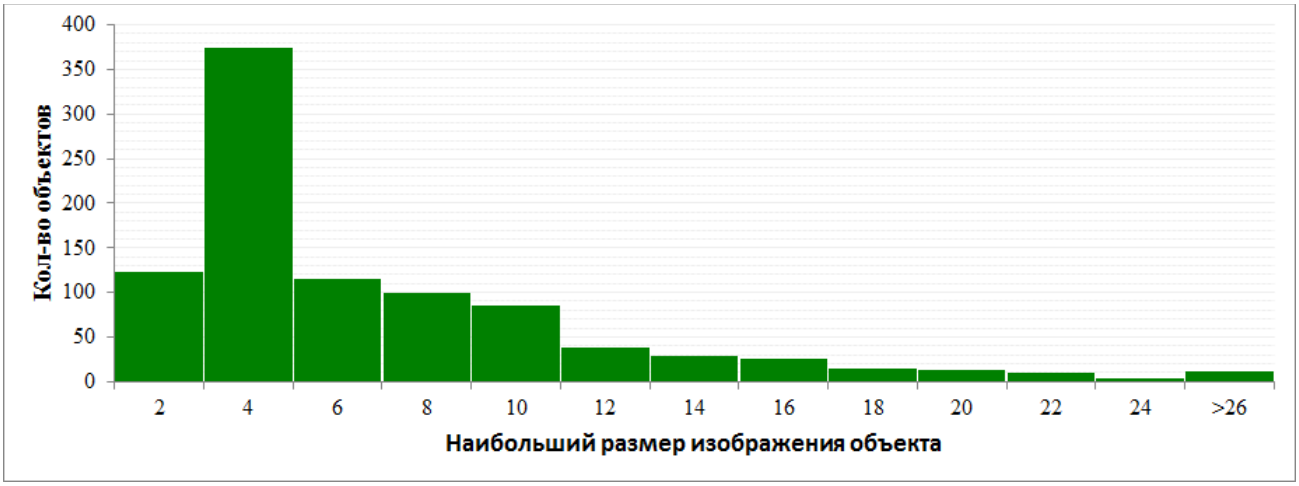


Рис. 2.17. Гістограма розмірів зображень обєктів на цифровому кадрі (VNT)

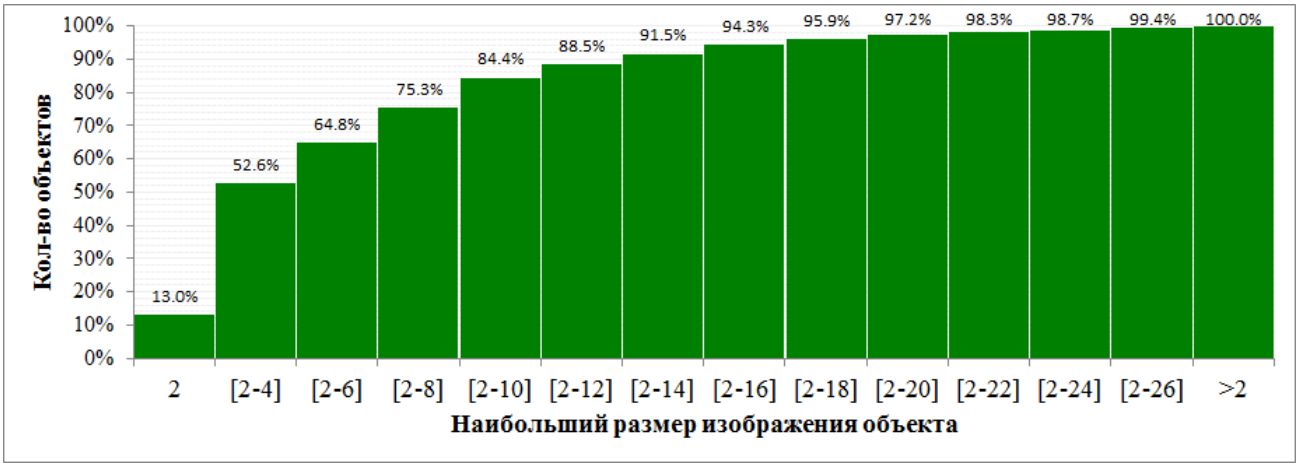


Рис. 2.18. Інтегральна гістограма розмірів зображень об'єктів на цифровому кадрі (VNT)

Рис. 2.19. Гістограма розмірів зображень об'єктів на цифровому кадрі (Genon)

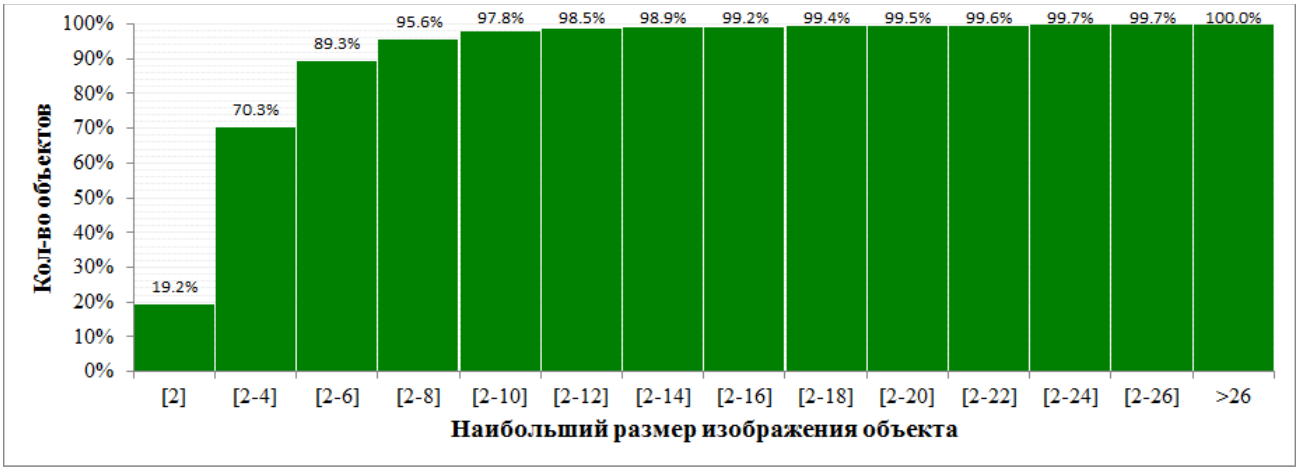


Рис. 2.20. Інтегральна гістограма розмірів зображень об'єктів на цифровому кадрі (Genon)

Рис. 2.21. Гістограма розмірів зображень об'єктів на цифровому кадрі (САНТЕЛ-400АН)

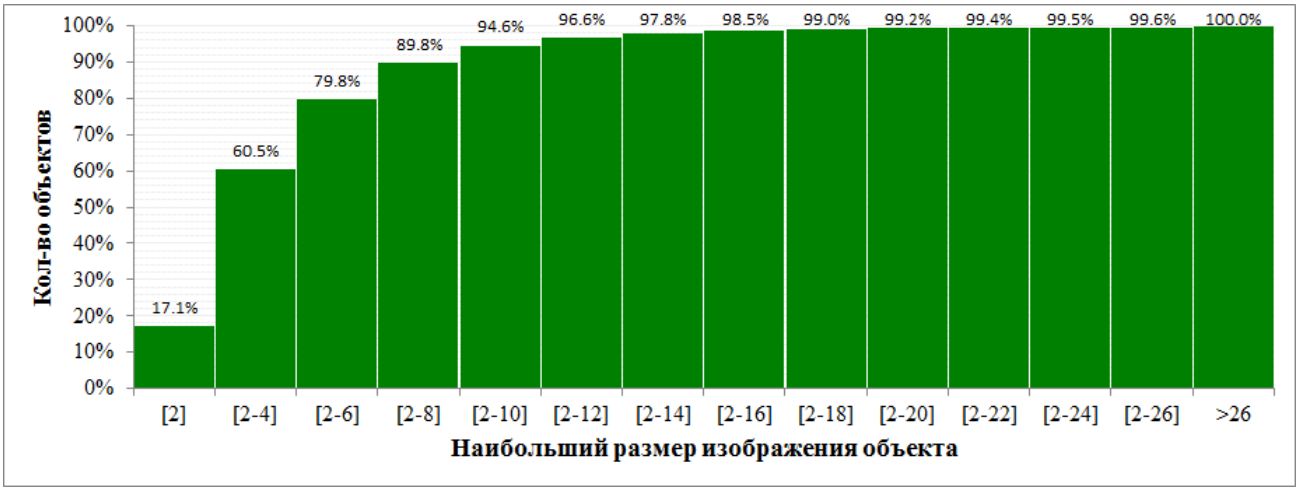


Рис. 2.22. Інтегральна гістограма розмірів зображень обєктів на цифровому кадрі (САНТЕЛ-400АН)

Можна було б заздалегідь для усіх зображень об'єктів робити велику область сегментації. Проте чим більше області сегментації, тим більше обчислювальні витрати для сегментації. Для вирішення завдання сегментації зображень об'єктів з мінімальними помилками при прийнятних обчислювальних витратах в роботі вибирається розмір області сегментації, який перевищує 92% зображених об'єктів. Для інших зображень об'єктів вводиться можливість адаптивного збільшення розміру області сегментації.

Таким чином, розмір області сегментування $\Omega_{binimgj}$, у ряді випадків може не включити усі пікселі, які належать до зображення об'єкту, який сегментується.

Очевидним критерієм для розміру області сегментування $\Omega_{binimgj}$ є наявність хоча б одного пікселя на межі бінарного зображення області сегментації із значенням яскравості, рівним $A_{ikj}=1$, на Рис. 2.23.

Рис. 2.23. Приклад відпрацювання критерію збільшення розміру області сегментації зображення об'єкту.

Для прямокутної області сегментування об’єкта мінімальні відстань d_{ikj} між довільно взятим пікселем з координатами (x_{ikj}, y_{ikj}) з області сегментування і межею даної області, визначається виразом:

$$d_{ikj} = \min(x_{ikj} - x_{bj},\ y_{ikj} - y_{bj},\ x_{ej} - x_{ikj},\ y_{ej} - y_{ikj}). \quad (2.7)$$

Для всіх пікселів, які належать до межі, дана відстань дорівнює $d_{ikj} = 0$.

Таким чином, необхідність збільшення розмірів області сегментування зображення об'єкту визначається наявністю на межі області пікселя з яскравістю, рівною $A_{ikj} = 1$:

$$\left(\min(x_{ikj} - x_{bj},\ y_{ikj} - y_{bj},\ x_{ej} - x_{ikj},\ y_{ej} - y_{ikj}) = 0\right) \wedge \left(A_{ikj} = 1\right). \quad (2.8)$$

При виконанні умови (2.8) розміри області R_{cxj}, R_{cyj} збільшуються на наперед задані константи:

$$R_{cxj} = R_{cxj} + \mu_{cx}, \quad (2.9)$$

$$R_{cyj} = R_{cxj} + \mu_{cy}, \quad (2.10)$$

де μ_{cx}, μ_{cy} - крок збільшення розмірів області сегментування, який використовується.

Збільшення розмірів області вимагає проведення операції повторної бінаризації області сегментації. При проведенні досліджень, значення констант μ_{cx} і μ_{cy} задавались рівними 5.

Ерозія бінарного зображення області сегментування. Відповідно до теорії множин, операція ерозії [1, 163, 170] бінарного зображення $\Omega_{binimgj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} задається виразом:

$$\Omega_{binimgj} - B_{srt} = \{z \mid (B)_z \subseteq \Omega_{binimgj}\}, \quad (2.11)$$

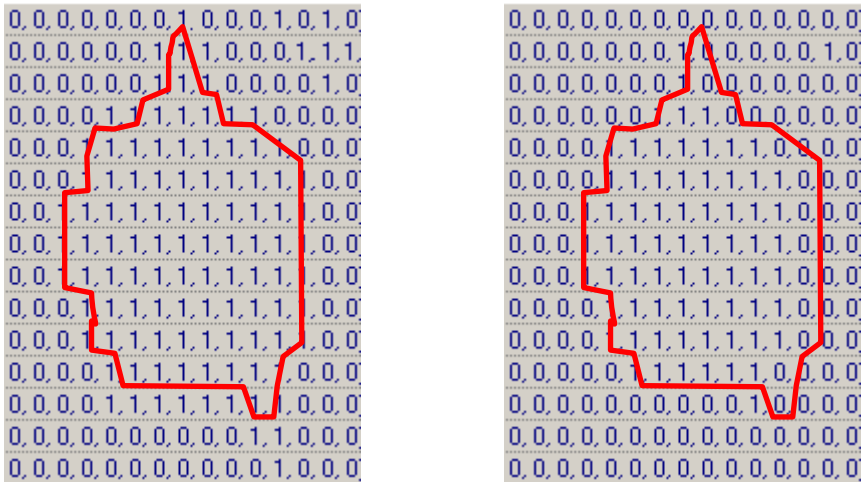
Операція ерозії є процесом переміщення структуроутворюючого елементу [124, 164, 167] по зображенню і фіксації положень його якоря [165, 166], в яких цей елемент цілком складається з пікселів зображення [1, 2, 14]. Іншими словами, ерозія множини $\Omega_{binimgj}$ по структуроутворюючому елементу B_{srt} – це множина всіх таких точок z, при зсуві в які, B_{srt} є підмножина множини $\Omega_{binimgj}$ ($B_{srt} \subseteq \Omega_{binimgj}$).

Оскільки немає ніяких переваг в напрямах продовження сегмента зображення, то структуроутворюючий елемент має бути симетричним. Розмір структуроутворюючого елементу визначається мінімальним розміром області, яка повинна залишитися після проведення операції ерозії [1, 2, 165].

Максимальний розмір артефактів зображення найчастіше складає 1-2 пікселі. У зв'язку з цим, для операції ерозії досліджуваних зображень в якості структуроутворюючого елементу B_{srt} використовувався елемент наступного виду:

$$\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{matrix} \qquad (2.12)$$

В результаті застосування операції ерозії (рисунок 2.24) формується очищене бінарне зображення області сегментації Ω_{eimgj}. На ньому видалені всі ділянки бінарного зображення області сегментування $\Omega_{binimgj}$, розмір яких менший, ніж заданий структуроутворюючий елемент (2.12).



а) б)

Рис. 2.24. Застосування операції ерозії:

а - зображення $\Omega_{binimgj}$; б - результат ерозії Ω_{eimgj}.

Операція морфологічної реконструкції бінарного зображення області сегментації. Операція морфологічної реконструкції [165, 169, 181] області виділяє елементи зображення пов'язані із заздалегідь заданим пікселем. Усі пікселі (тобто елементи зв'язаної компоненти), які виділяються, на бінарному зображенні мають значення яскравості, яка дорівнює $A_{ik} = 1$.

На очищеному бінарному зображенні Ω_{eimgj} відновлюється тільки зображення j-го об’єкта, який сегментується. Стартовим пікселем для проведення операції морфологічної реконструкції є пік зображення j-го об’єкта, який сегментується, з координатами (x_{pj}, y_{pj}). У зв'язку з тим, що відновленню підлягає тільки зображення одного об'єкту, операція морфологічної реконструкції зводиться до операції виділення пікселів, пов'язаних з піком зображення об’єкта, який сегментується.

Операція морфологічної реконструкції може бути реалізована з використанням ітераційної процедури, на k-му кроці якої виконується наступна послідовність операцій.

1. Відбирається чотири суміжні пікселі, які формують структуроутворюючий елемент B_{srt} відносно пікселя з координатами $(x_{ikj}$,

y_{ikj}), який обробляється на k-му кроці:

$$\begin{matrix} & (\mathrm{x}_{ikj}\ ,\mathrm{y}_{ikj}\ -1) & \\ (\mathrm{x}_{ikj}\ -1,\mathrm{y}_{ikj}\ ) & (\mathrm{x}_{ikj}\ ,\mathrm{y}_{ikj}\ ) & (\mathrm{x}_{ikj}\ +1,\mathrm{y}_{ikj}\ ) \\ & (\mathrm{x}_{ikj}\ ,\mathrm{y}_{ikj}\ +1) & \end{matrix} \qquad (2.13)$$

2. По кожному з відібраних чотирьох пікселів, робиться перевірка на рівність значення їх яскравості $A_{ik}=1$ в очищеному бінарному зображенні Ω_{eimgj}. Пікселі, значення яскравості яких дорівнює $A_{ik}=1$, визначаються як такі, що пов'язані з піком j-го зображення об’єкта, який сегментується.

У теорії множин, цей крок операції морфологічної реконструкції може бути представлений виразами [1, 2, 164]:

$$U_k=(U_k\oplus B_{srt})\cap\Omega_{eimgj}, \qquad (2.14)$$

де U_k - піксель з координатами $(\mathrm{x}_{ikj}\ ,\mathrm{y}_{ikj})$, який обробляється на k-му кроці.

Взяте перетинання з очищеним бінарним зображенням Ω_{eimgj} на кожному кроці ітерації виключає з результуючого зображення положення центра структуроутворюючого елемента B_{srt}, який припадає на пікселі із значенням яскравості $A_{ik}=0$.

3. Пункти 1, 2 повторюються для кожного із відібраних пікселів з попереднього кроку.

Таким чином, в процесі проведення операції морфологічної реконструкції, переміщення структуроутворюючого елементу B_{srt} по зображенню і фіксація положень його центру [165, 166] робиться в пікселях, для яких існує шлях від піку зображення j-го об'єкту, який сегментується і складається з пікселів зі значеннями яскравості $A_{ik}=1$ (Рис. 2.25.). Для

пікселів, що належать зображенню сусіднього об'єкту, такий шлях відсутній (на Рис. 2.13. помічені жовтим кольором). У зв'язку з цим ці пікселі будуть виключені з результуючого зображення (значення їх яскравості буде рівне $A_{ik} = 0$).

а) б) в) г)

Рис. 2.25. Операція морфологічної реконструкції бінарного зображення області сегментації: а) 1-а ітерація б) 2-а ітерація в) 9-а ітерація г) остання ітерація

В результаті застосування розглянутої операції формується реконструйоване бінарне зображення $\Omega_{binrecj}$.

Операція дилатації бінарного зображення області сегментування. Операція дилатації[14, 165, 168] області є другою частиною операції розмикання і виконується з тим самим структуроутворюючим елементом B_{srt} Операція дилатації [1, 163, 170] реконструйованого бінарного зображення $\Omega_{binrecj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} визначається виразом:

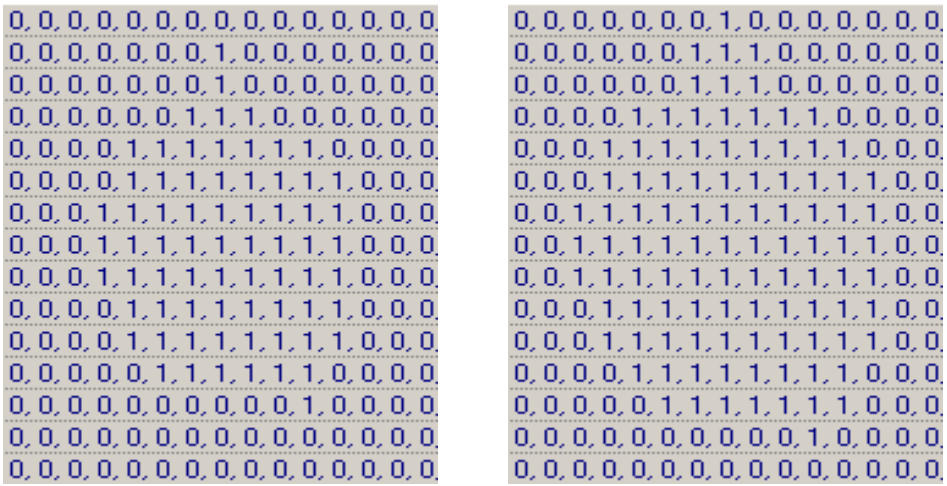
$$\Omega_{binrecj} \oplus B_{srt} = \{z \mid (\hat{B}_{srt})_z \cap \Omega_{binrecj} \neq \varnothing\}, \qquad (2.15)$$

де $\hat{B}_{srt}$ - центральне відображення множини B_{srt}.

Операція дилатації є процесом переміщення структуроутворюючим

елементом B_{srt} по зображенню $\Omega_{binrecj}$ і фіксації положень його якоря [165, 166] у яких цей елемент хоча б одним з одиничних пікселів поєднався з хоча б одним з одиничних пікселів зображення $\Omega_{binrecj}$. Іншими словами, це множина всіх таких поєднань z, при яких множина $\hat{B}_{srt}$ і $\Omega_{binrecj}$ співпадають щонайменше в одному елементі (Рис. 2.26.).

.



а) б)

Рис. 2.26. Застосування операції дилатації:

а) зображення $\Omega_{binrecj}$; б) результат дилатації $\Omega_{bindelj}$.

Виконання операції дилатації дозволяє відновити пікселі, видалені при виконанні операції ерозії, але які все одно належать до зображення об'єкта, який сегментується. В результаті застосування операції дилатації для відновленого бінарного зображення області сегментації $\Omega_{binrecj}$, формується зображення області, на якій піксели зі значеннями яскравості $A_{ik}=1$ відносяться до виділеного зображення об’єкта Ω_{sbobjj}. Виходячи з вище сказаного, обчислювальний метод сегментації зображень поодиноких об’єктів є наступною послідовністю операцій (Рис. 2.27.).

1. З метою зменшення кількості неправдивих піків проводиться обробка цифрового кадру з використанням згладжуючого цифрового фільтра низьких частот (2.1). У роботі, в якості згладжуючого фільтру, використовувався низькочастотний фільтр Гауса (Г.3).

2. На цифровому кадрі проводиться попереднє виявлення зображень об'єктів кореляційним методом з обмеженими обчислювальними затратами. Для цього використовуються кореляційні визначники (1.1)(1.2). В окремому випадку, для максимального скорочення обчислювальних витрат при попередньому виявленні зображень об’єктів можна аналізувати тільки яскравості піків зображень. При цьому, як вирішальна статистика використовується оцінка відношення сигнал/шум $q_{peak(j)}$ у піку зображення (1.3). При попередньому виявленні формується множина виявлених зображень об'єктів $\Omega_{\det img}$ (множина зображень), які сегментуються. Кожному виявленому зображенню об'єкта ставиться у відповідність пік з координатами (x_{pj}, y_{pj}).

3. Для кожного виявлення зображення об’єкта з множини $\Omega_{\det img}$ при попередній підготовці бінарного зображення області сегментування виконується наступна послідовність дій (блоки 2.1-2.4).

3.1. В околі піка зображення j-го об’єкта, який сегментується, з координатами (x_{pj}, y_{pj}) задається область сегментування Ω_{imgj} з кутовими розмірами R_{cx}, R_{cy}.

3.2. Формується бінарне зображення області сегментування $\Omega_{binimgj}$. Одиницями у бінарному зображенні області сегментації $\Omega_{binimgj}$ заповнюються пікселі, яскравість яких задовольняє правилу бінаризації (2.4).

3.3. Для забезпечення можливості сегментації зображень об'єктів з малою кількістю пікселів, проводиться масштабування зображення виділеної області $\Omega_{binimgj}$ заданим коефіцієнтом μ_{sc} згідно виразів (2.2а).

3.4. Перевіряється умова (2.8) необхідності збільшення розмірів області сегментування зображення об'єкту. При виконанні умови (2.8) для сегментації зображень об'єктів, розмір яких перевищує заздалегідь заданий, розміри області сегментації R_{cxj}, R_{cyj} збільшуються відповідно до виразів (2.9), (2.10).

4. З метою виключення пікселів зображення бінарної області сегментування $\Omega_{binimgj}$, які не належать до зображення j-го сегментованого об’єкта, для кожної підготовленої області сегментації виконується розмикання з морфологічною реконструкцією (розмикання реконструкцією), яка проводиться додатково. Ця операція містить таку послідовність дій:

4.1. На першому етапі, для видалення паразитних пікселів, що порушують форму зображення, що сегментується, проводиться ерозія бінарного зображення області сегментації $\Omega_{binimgj}$ структуротворним елементом B_{srt} (2.12) згідно з виразом (2.11). В результаті формується очищене бінарне зображення області сегментації Ω_{eimgj}.

4.2. Для виключення з очищеного бінарного зображення області сегментування Ω_{eimgj} елементів зображення, які не належать до зображення j -го об'єкта, який сегментується, проводиться операція морфологічної реконструкції (2.14). В результаті формується реконструйоване бінарне зображення області сегментації $\Omega_{binrecj}$. Елементи зображення, які становлять окремі локальні області поодиноких пікселів і не пов'язані із зображенням j-го об'єкту, який сегментується, виключаються із зображення бінарної області сегментації $\Omega_{binrecj}$ (приймають значення яскравості рівним $A_{ik} = 0$.) Пікселі, пов’язані з піком зображення j-го об’єкта, який сегментується, залишаються на бінарному зображенні області сегментування $\Omega_{binrecj}$ (приймають значення яскравості, яка дорівнює $A_{ik} = 1$).

4.3. Згідно з виразом (2.15) проводиться друга частина операції розмикання – операція дилатації реконструйованого зображення області сегментування $\Omega_{binrecj}$ структуроутворюючим елементом B_{srt} (2.12). У результаті: відновлюються пікселі, пов’язані із зображенням j-го об’єкта, який сегментується, але видалені при проведенні операції ерозії (пункт 4.1). У більшості випадків, відновлювальні пікселі не є паразитними і можуть бути віднесені до зображення об’єкта, який сегментується.

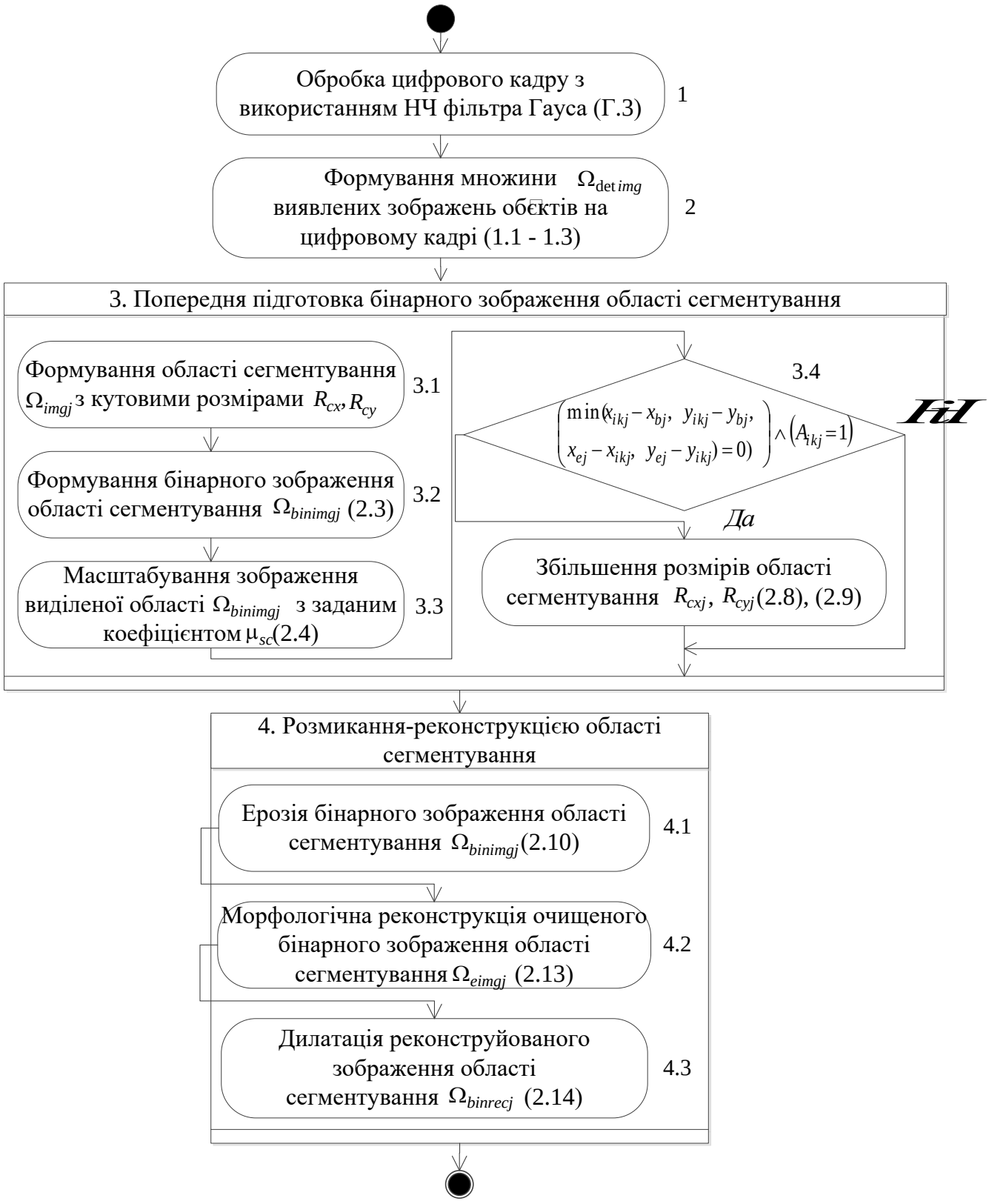


Рис. 2.27. UML діаграма обчислювального методу сегментації зображень поодиноких об’єктів

2.3. Обчислювальний метод сегментації компактних груп статистично пов'язаних зображень близьких об'єктів на цифрових зображеннях.

Відповідно до постановки задачі, на типі цифрових кадрів, які досліджується, можлива наявність зображень об'єктів, які складають компактну групу об'єктів з статистично залежними зображеннями. Іншими словами, в області сегментації Ω_{imgj} може бути присутнім пов'язане, статистично залежне зображення компактної групи об'єктів, яке вимагає розділення на зображення окремих об'єктів.

При сегментації зображень одиночних об'єктів (підрозділ 2.2) пікселі відносяться або до фону, або до зображення об’єкта, який сегментується. Для проведення сегментації з прийнятними обчислювальними затратами використовувалося бінарне зображення області сегментації Ω_{eimgj}. Це зображення не містить інформації про зміни яскравості в області сегментації. Для розділення зображень компактної групи об'єктів, виникає необхідність враховувати перепад яскравості пікселів в зображенні виділеного сегменту Ω_{sobjj}. У зв'язку з цим, відновлюється півтонове зображення j-го виділеного сегмента Ω_{sobjj} за даними первинного кадра. На Рис. 2.28. показаний приклад області, компактної групи, яка містить зображення двох об'єктів.

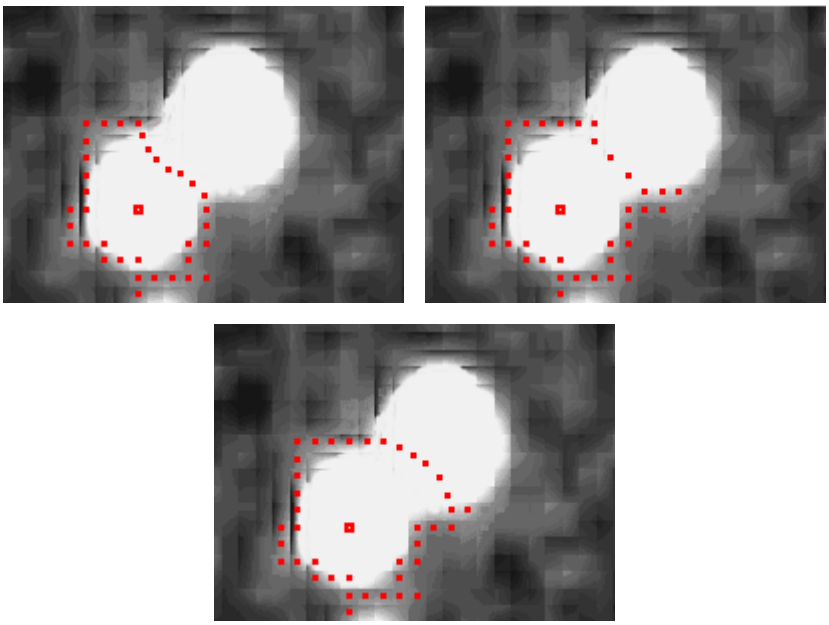
Відповідно до надпіксельної гаусової моделі, яка використовується, [177], зображення компактної групи об'єктів може бути представлене як сукупність двовимірних гаусіан. Вважається, що пік зображення j-го об’єкта, який сегментується, (x_{pj}, y_{pj}) знаходиться в околі максимуму гаусіани. У зв’язку з цим, в методі, який розробляється, пік зображення j-го об’єкта, який сегментується, використовується як стартовий піксель для розділення зображень компактної групи.

Рис. 2.28. Приклад зображення компактної групи, яка містить два об’єкта. Червоним показано пікселі, виділені відповідно до правила бінаризації (2.4). Зеленим і чорним – припустиме розділення пікселів між зображеннями об'єктів компактної групи.

Значення гаусіани зменшуються від максимуму до її країв. Таким чином, при русі від піку j-го зображення об'єкту (максимуму гаусіани), який сегментується, зростання яскравості пропонується брати як умову розділення зображень об'єктів компактної групи.

У зв'язку з наявністю шумів на цифровому кадрі і вказаною особливістю зображень компактних груп допускається, що частина пікселів, значення яскравості яких при русі від центру j-го зображення об’єкта, який сегментується, збільшується. Вони також можуть бути віднесені до зображення, яке сегментується. Звичайно, при цьому слід пам'ятати, що для спостереження доступні тільки згруповані події падіння фотонів, які відбулися за час експозиції кадру. Кожен піксель зображення компактної групи об'єктів може містити фотони від усіх джерел випромінювання, які формують зображення компактної групи об'єктів.

Іншими словами, пропонується ввести критичне значення збільшення яскравості μ_{fbr}, при якому приймається рішення про віднесення пікселя до зображення j-го об’єкта, який сегментується (Рис. 2.29.).



а) б) в)

Рис. 2.29. Приклад сегментації зображення компактної групи при різних значеннях μ_{fbr}: а) $\mu_{fbr}=0$; б) $\mu_{fbr}=0.15$; в) $\mu_{fbr}=0.4$.

Обчислювальний метод сегментації компактних груп статистично пов'язаних зображень близьких об'єктів на цифрових зображеннях є послідовністю таких операцій:

1. Проводиться сегментація бінарних зображень об'єктів з формуванням множини сегментів Ξ_{sobj}, кожний із яких характеризується координатами (x_{pj}, y_{pj}) піка, як стартового пікселя сегмента, і містить сукупність Ω_{sbobjj} пікселів виділеного у процесі сегментації зображення об’єкта або компактної групи об’єктів. Для цього використовується обчислювальний метод сегментації зображень одиночних об’єктів (п. 2.2) .

2. Формується множина піків, як стартових пікселів сегментів, координати яких входять j-й сегмент Ω_{sobjj}.

3. У кожному сегменті зображення визначається кількість піків, як стартових пікселів сегменту.

4. Якщо для j-го сегменту Ω_{sbobjj} кількість піків, як стартових пікселів сегментів, більша за 1 ($N(\Omega_{sbobjj})>1$), то приймається рішення, що j-й

сегмент є зображенням компактної групи об’єктів і проводиться поділ зображення компактної групи на сукупність зображень одиничних об’єктів (блоки 5–7). В іншому випадку, здійснюється перехід до наступного сегменту кадра (блок 2).

5. Для всіх стартових пікселів $N(\Omega_{sbobjj})$, які належать j-му сегменту Ω_{sbobjj}, буде сформований сегмент Ω_{sbobjj}. Отже, $N(\Omega_{sbobjj})$ сегментів будуть дублюватися у множині Ξ_{sobj}. Для зменшення обчислювальних затрат дублікати сегменту Ω_{sbobjj} вилучаються з розгляду. Замість вказаних $N(\Omega_{sbobjj})$ сегментів використовується один сегмент Ω_{sbobjj}, який має множину стартових пікселів (піків) θ_{peaksj}.

6. Відновлюється півтонове зображення j-го сегмента за даними первинного кадру у зв’язку з відсутністю на бінарному зображенні Ω_{sbobjj} інформації про перепади яскравості пікселів.

7. Для кожного l-го стартового пікселя сегмента, який належить j-му сегменту Ω_{sobjj}, аналізуються його пікселі для розділення зображення компактної групи на сукупність зображень одиночних об’єктів (7.1– 7.3).

7.1. Вибір наступного ik-го піксела півтонового зображення j-го сегмента Ω_{sobjj}. Піксел, який вибирається, повинен бути сусідом піксела попередньої $(n-1)$ ітерації і володіти меншим значенням яскравості на півтоновому зображенні Ω_{sobjj}. При відсутності даного піксела, процес закінчується. Для першої ітерації ($n=1$) в якості ik-го пікселя вибирається l-й стартовий піксел j-го сегмента Ω_{sobjj}.

7.2. Для ik-го пікселя приймається рішення про віднесення його до зображення l-го об’єкта, якщо значення його яскравості на півтоновому зображенні Ω_{sobjj} менше значення яскравості сусіднього піксела з попередньої $(n-1)$ ітерації:

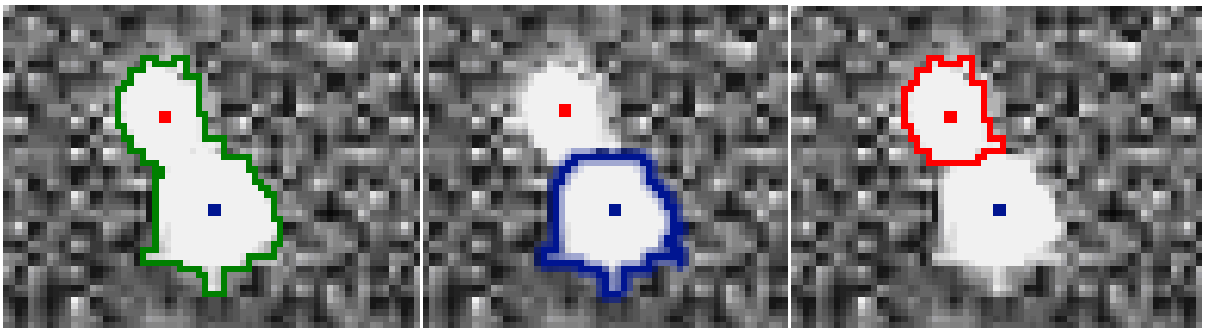
$$A_{ikjn} < A_{ikjn-1}. \qquad (2.17)$$

7.3. У іншому випадку перевіряється, чи збільшується значення його яскравості відносно сусіднього пікселя з попередньої $(n-1)$ ітерації в межах заданого критичного значення:

$$\frac{A_{ikjn-1} - A_{ikjn}}{A_{ikjn-1}} < \mu_{fbr}, \qquad (2.18)$$

Якщо умова (2.18) виконується, приймається рішення про віднесення ik-го піксела до l-го зображення об’єкта.

Сегментація зображень об'єктів на цифровому кадрі проводиться для кожного заздалегідь виявленого піку. На етапі виділення одиночного об'єкту можливість наявності в області сегментації зображення більше одного об'єкта не враховується. Отже, зображення виділених сегментів, які отримані при сегментації із стартовим пікселем будь-якого зображення компактної групи об'єктів, на етапі виділення одиничного об'єкту будуть співпадати (Рис. 2.30(а)). В результаті роботи метода, який пропонується, сегментації компактних груп статистично зв’язаних зображень близьких об’єктів із зображення сегмента виділяються зображення одиночних об’єктів (Рис. 2.30 (б), (в)). Для використання цього методу (див. UML діаграму на рис. 2.31) з прийнятними (близькими до мінімальних) обчислювальними витратами, його доцільно об’єднати з обчислювальним методом сегментації протяжних зображень об'єктів на цифрових зображеннях.



а) б) в)

Рис. 2.30. Зображення компактної групи об’єктів: а) зображення, виділене як зображення одиничного об’єкта; б) результат сегментації зображення j-го об’єкта; в) результат сегментації зображення близького об’єкта.

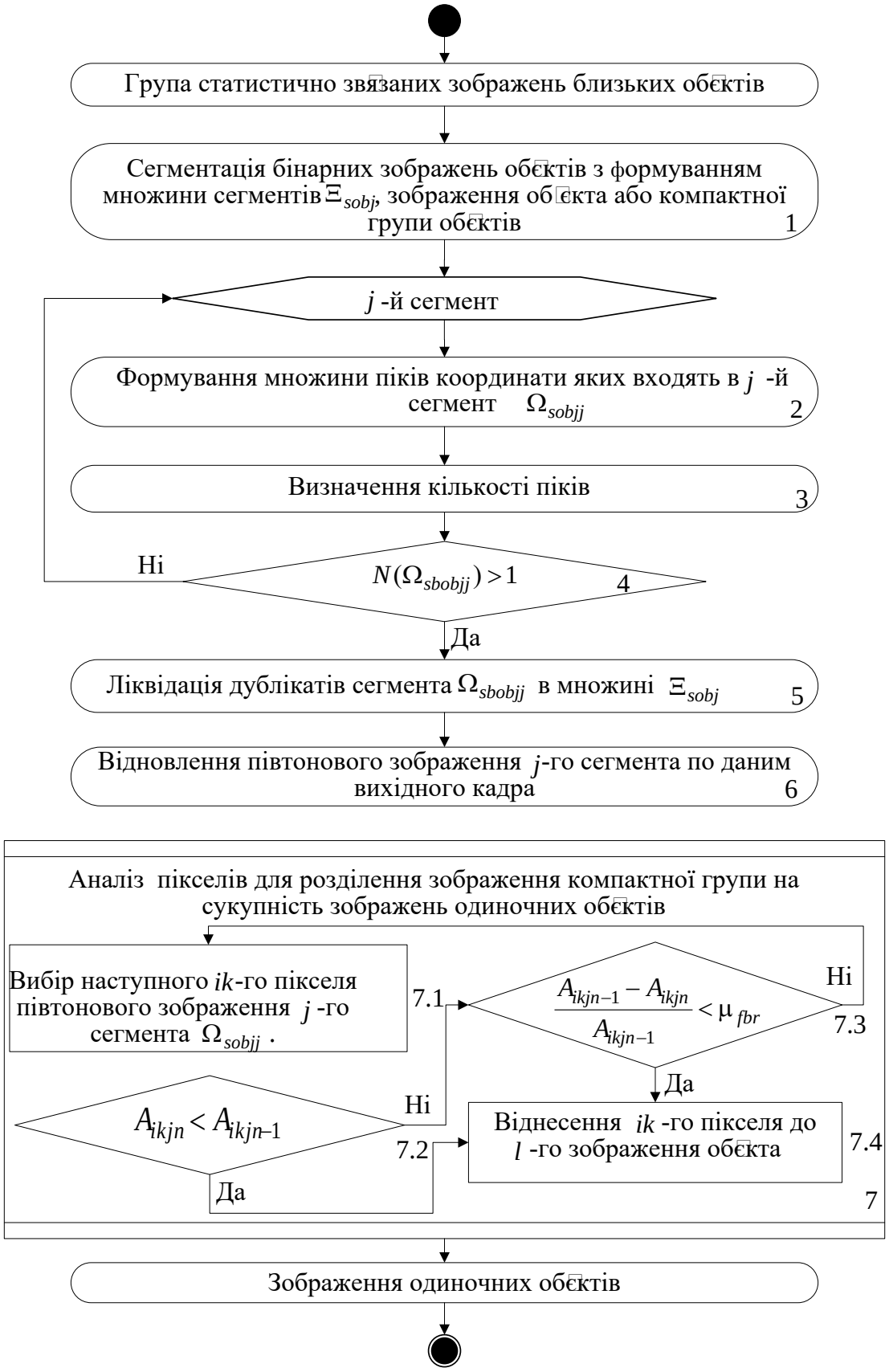


Рис. 2.31. UML діаграма обчислювального методу сегментації компактних груп статистично пов’язаних зображень близьких об’єктів на цифрових зображеннях

3 МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ ТА ПМЗ ФОТОМЕТРІЇ НЕБЕСНИХ ОБ'ЄКТІВ НА СЕРІЇ ПЗЗ-КАДРІВ

3.1 Обчислювальний метод автоматичного вибору зір порівняння в кадрі

Для вибору зір порівняння організовується перебір комбінацій допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$, якими є будь-які підмножини заданої множини допустимих зір порівняння Ω_{reffsel}, які складаються з двох і більше зір. Наприклад, якщо задано три зорі порівняння з номерами 1, 2, і 3, то мають місце такі комбінації допустимих зір порівняння: {1,2}, {1,3}, {2,3}, {1,2,3}. Загальна кількість допустимих комбінацій N_{accept} визначається виразом [1]:

$$N_{\text{accept}} = \sum_{i=2}^{N_{\text{reffsel}}} C_{N_{\text{reffsel}}}^{i}, \tag{3.1}$$

де $C_{N_{\text{reffsel}}}^{i} = \frac{N_{\text{reffsel}}!}{(N_{\text{reffsel}}-i)!i!}$ – кількість **поєднань** із N_{reffsel} допустимих зір порівняння по i. Для кожної комбінації допустимих зір порівняння виконується наступна послідовність операцій.

1. Визначення коефіцієнта редукції інструментального блиску $\eta_{\ell n}$ для ℓ-ої комбінації допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$ з n-го кадру множини допустимих кадрів Ξ_{beg} на базовий кадр:

$$\eta_{\ell n} = \sum_{j=1}^{N_{\text{accept}\ell}} m_{\text{Ijn}} / \sum_{j=1}^{N_{\text{accept}\ell}} m_{\text{IBj}}, \tag{3.2}$$

де $N_{\text{accept}\ell}$ – кількість зір в ℓ-й комбінації (поєднанні) допустимих зір порівняння.

2. Редукція інструментального блиску $m_{\text{IRj}(\ell,n)}$ j-ї допустимої зорі порівняння, яка входить в ℓ-ту комбінацію допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$, з n-го кадру на базовий кадр відповідно до виразу:

$$m_{\text{IRj}(\ell,n)} = \frac{m_{\text{Ijn}}}{\eta_{\ell n}}. \tag{3.3}$$

3. Для ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$ на всіх кадрах множини допустимих кадрів Ξ_{beg} розраховується інструментальний блиск m_{IRVSn} зорі, яка досліджується, редукований на базовий кадр:

$$m_{\text{IRVSn}} = \frac{m_{\text{IVSn}}}{\eta_{\ell n}}. \tag{3.4}$$

4. Для j-ї зорі ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$ розраховується дисперсія $\sigma^2_{m\ell j}$ редукованого інструментального блиску на множині допустимих кадрів Ξ_{beg}, відповідно до виразів:

$$\sigma^2_{m\ell j} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{beg}}} \left(m_{\text{IRj}(\ell,n)}\right)^2}{N_{\text{beg}}-1} - \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{beg}}} m_{\text{IRj}(\ell,n)}}{N_{\text{beg}}-1}\right)^2. \tag{3.5}$$

5. Розрахунок вагового множника j-ї зорі порівняння ℓ-ї множини допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$ на основі дисперсії $\sigma^2_{m\ell j}$ редукованого інструментального блиску. Для цього розраховується сума значень, обернених дисперсіям $\sigma^2_{m\ell j}$ редукованого інструментального блиску:

$$v_\ell = \sum_{j=1}^{\text{Naccept}\ell} \frac{1}{\sigma^2_{m\ell j}}. \tag{3.6}$$

Вага j-ї зорі ℓ-ї множини допустимих зір порівняння $\Omega_{\text{accept}\ell}$ розраховується відповідно з виразом:

$$v_{\ell j} = \frac{1}{v_\ell \sigma^2_{m\ell j}}. \tag{3.7}$$

6. Розрахунок блиску зорі, яка досліджується, $m_{\text{VS}\ell n}$ і штучної (середньої) m_{synn} зорі на n-му кадрі ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння. Для цього, у відповідності до [2], із ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння вибирається головна зоря порівняння. Середнє значення інструментального блиску $\bar{m}_{I\beta\ell}$ головної зорі порівняння, обчислюється на множині допустимих кадрів Ξ_{beg}.

Відповідно до [2], обчислюється відкоригований інструментальний блиск $m_{I\beta\ell n}$ головної зорі порівняння на n-му кадрі ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння як:

$$m_{I\beta\ell n} = \bar{m}_{I\beta\ell} + \frac{1}{v_{\Sigma\ell}} \sum_{j=1}^{\text{Naccept}\ell} v_{\ell j}\left(m_{\text{Ijn}} - \bar{m}_{\text{Ij}}\right), \tag{3.8}$$

$$v_{\Sigma\ell} = \sum_{j=1}^{\text{Naccept}\ell} v_{\ell j}, \tag{3.9}$$

де $\bar{m}_{\mathrm{lj}} = \frac{1}{N_{\mathrm{beg}}} \sum_{n=1}^{N_{\mathrm{beg}}} m_{\mathrm{Ijn}}$ – середнє значення інструментального блиску j-ї зорі ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння на множині допустимих кадрів Ξ_{beg}.

Блиск $m_{\mathrm{VS}\ell n}$ зорі, яка досліджується, і штучної (середньої) $m_{\mathrm{syn}\ell n}$ зорі на n-му кадрі ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння, відповідно до [2], обчислюються за виразами (формулами):

$$m_{\mathrm{VS}\ell n} = m_{\mathrm{IVSn}} - m_{I\beta\ell n} + m_{\mathrm{cat}\beta}, \tag{3.10}$$

$$m_{\mathrm{syn}\ell n} = m_{\mathrm{synn}} - m_{I\beta\ell n} + m_{\mathrm{cat}\beta}, \tag{3.11}$$

де $m_{\mathrm{cat}\beta}$ – каталожна оцінка блиску головної зорі порівняння.

7. Для вибору найкращої комбінації допустимих зір порівняння, визначається СКВ $\sigma_{\mathrm{syn}\ell}$ блиску штучної (середньої) зорі для ℓ-ї комбінації допустимих зір порівняння $\Omega_{\mathrm{reffsel}}$:

$$\sigma_{\mathrm{syn}\ell} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\mathrm{Nbeg}} \left(m_{\mathrm{syn}\ell n}\right)^2}{N_{\mathrm{beg}} - 1} - \left(\frac{\sum_{n=1}^{\mathrm{Nbeg}} m_{\mathrm{syn}\ell n}}{N_{\mathrm{beg}} - 1}\right)^2}. \tag{3.12}$$

3.2 Обчислювальний метод розрахунку апертурної яскравості зображень небесних об’єктів на ПЗЗ кадрах

Постановка задачі. На підставі вихідних даних необхідно для кожного ПЗЗ-кадру серії знайти сукупність інструментальних блисків зорі, яка досліджується:

$$\Omega_{\mathrm{mVS}} = (m_{I\,\mathrm{VS1}}, \ldots, m_{I\,\mathrm{VSn}}, \ldots, m_{I\,\mathrm{VS\,Nfr}}), \tag{3.13}$$

і кандидатів на зорі порівняння (для $j = \overline{1, N_{\mathrm{ref}\,f}}$):

$$\Omega_{\mathrm{mj}} = (m_{I\,j1}, \ldots, m_{I\,\mathrm{jn}}, \ldots, m_{I\,\mathrm{jNfr}}), \tag{3.14}$$

де $m_{I\,\mathrm{VSn}}$, $m_{I\,\mathrm{jn}}$ – інструментальний блиск зорі, яка досліджується, і j-го кандидата на зорю порівняння в n-му кадрі серії відповідно; $N_{\mathrm{ref}\,f}$ – кількість кандидатів в зорі порівняння; N_{fr} – кількість ПЗЗ-кадрів серії.

Також для кожного ПЗЗ-кадра серії необхідно знайти сукупність апертурних яскравостей зорі, яка досліджується:

$$\Omega_{\mathrm{AVS}} = (A_{\mathrm{VS1}}, \ldots, A_{\mathrm{VSn}}, \ldots, A_{\mathrm{VS\,Nfr}}), \tag{3.15}$$

і кандидатів в зорі порівняння:

$$\Omega_{\mathrm{Aj}} = (A_{j1}, \dots, A_{\mathrm{jn}}, \dots, A_{\mathrm{jNfr}}), \tag{3.16}$$

де A_{VSn}, A_{jn} – апертурна яскравість зорі, яка досліджується, і j- го кандидата на зорю порівняння в n-му кадрі серії відповідно. Визначення апертурної яскравості та інструментального блиску зображень всіх кандидатів на зорі порівняння і зорі, яка досліджується, виконується з однаковим радіусом апертури фотометрії на всіх ПЗЗ-кадрах серії.

Вихідні дані. Задано N_{fr} кадрів, які складають серію:

$$\Xi_{\mathrm{set}} = \{\Xi_{\mathrm{fr1}}, \dots, \Xi_{\mathrm{frn}}, \dots, \Xi_{\mathrm{Nfr}}\}, \tag{3.17}$$

де Ξ_{frn} – n-й ПЗЗ-кадр серії. Спостерігачем або автоматично задається зоря, яка досліджується, $N_{\mathrm{ref}\,f}$ кандидатів на зорі порівняння $\Omega_{\mathrm{ref}\,f}$.

На кадрах серії, в результаті внутрішньокадрової обробки, виділені сегменти (область внутрішньокадрової оброки – ОВКО) пікселів зображення зорі, яка досліджується:

$$\Psi_{\mathrm{VSset}} = \{\Psi_{\mathrm{VSfr1}}, \dots, \Psi_{\mathrm{VSfrn}}, \dots, \Psi_{\mathrm{VSNfr}}\}, \tag{3.18}$$

і сегменти пікселів (ОВКО) зображень кандидатів на зорі порівняння ($\forall j = \overline{1, N_{\mathrm{ref}\,f}}$):

$$\Psi_{\mathrm{jset}} = \{\Psi_{\mathrm{jfr1}}, \dots, \Psi_{\mathrm{jfrn}}, \dots, \Psi_{\mathrm{jNfr}}\}, \tag{3.19}$$

де Ψ_{VSfrn} – сегмент (область внутрішньокадрової обробки, ОВКО) пікселів зображення досліджуваної зорі n-го кадру серії; Ψ_{jfrn} – сегмент пікселів зображення j-го кандидата на зорі порівняння n-го кадру серії. На кадрах серії процедурами внутрішньокадрової обробки отримані позиційні вимірювання зорі, яка досліджується:

$$\Omega_{\mathrm{XYVSset}} = (Y_{K\,1(i,1)}, \dots, Y_{K\,\mathrm{kvs}(i,n)}, \dots, Y_{K\,\mathrm{NVSmea}(i,\mathrm{Nfr})}) =$$

$$= ((x_{1(i,1)}, y_{1(i,1)}), \dots, (x_{\mathrm{kvs}(i,n)}, y_{\mathrm{kvs}(i,n)}), \dots, (x_{\mathrm{NVSmea}(i,\mathrm{Nfr})}, y_{\mathrm{NVSmea}(i,\mathrm{Nfr})})), \tag{3.20}$$

і кандидатів на зорі порівняння:

$$\Omega_{\mathrm{XYjset}} = (Y_{K\,1(j,i,1)}, \dots, Y_{K\,k(j,i,n)}, \dots, Y_{K\,\mathrm{Njmea}(j,i,\mathrm{Nfr})}) =$$

$$= ((x_{1(j,i,1)}, y_{1(j,i,1)}), \dots, (x_{k(j,i,n)}, y_{k(j,i,n)}), \dots, (x_{\mathrm{Njmea}(j,i,\mathrm{Nfr})}, y_{\mathrm{Njmea}(j,i,\mathrm{Nfr})})), \tag{3.21}$$

де $k(j,i,n) = k$ – номер вимірювання j-го кандидата на зорю порівняння в серії

вимірювань, яке є i-м вимірюванням n-го кадра; $k_{\mathrm{VS}}(i,n)=k$ – номер вимірювання зорі, яка досліджується, в серії вимірювань, яке є i-м вимірюванням n-го кадра; $Y_{K\,\mathrm{kvs}(i,n)}=(x_{\mathrm{kvs}(i,n)};y_{\mathrm{kvs}(i,n)})$, $Y_{K\,k(j,i,n)}=(x_{k(j,i,n)};y_{k(j,i,n)})$ – позиційне вимірювання (оцінка положення) зорі, яка досліджується, і j-го кандидата зорі порівняння n-го кадра, яке складає k-е вимірювання серії даної зорі; $x_{\mathrm{kvs}(i,n)}$, $y_{\mathrm{kvs}(i,n)}$ и $x_{k(j,i,n)}$, $y_{k(j,i,n)}$ – позиційне вимірювання (оцінка положення) зорі, яка досліджується, та j-го кандидата на зорю порівняння n-го кадру, яке міститься в k-му вимірюванні серії даної зорі; N_{VSmea}, N_{jmea} – кількість сформованих позиційних вимірювань зорі, яка досліджується, та j-го кандидата на зорі порівняння на N_{fr} кадрах відповідно.

Можливо, позиційне вимірювання зорі, яка досліджується, і кандидатів в зорі порівняння будуть сформовані не на всіх N_{fr} кадрах. Тому, у загальному випадку, кількість вимірювань серії, які відповідають досліджуваній зорі, або кандидатам на зорю порівняння, може бути меншою за кількості кадрів серії ($N_{\mathrm{VSmea}}\le N_{\mathrm{fr}}, N_{\mathrm{jmea}}\le N_{\mathrm{fr}}$).

Окремо хотілося би відзначити, що позиційні вимірювання кандидатів n-го кадру на зорі порівняння серії складають множину $\Omega_{\mathrm{XYn\,set}}$:

$$\Omega_{\mathrm{XYn\,set}}=(Y_{K\,k(j,i,n)},\dots,Y_{k(j,i,n)},\dots,Y_{k(\mathrm{Nnreff},i,n)})=$$
$$=((x_{k(1,i,n)},y_{k(1,i,n)}),\dots,(x_{k(j,i,n)},y_{k(j,i,n)}),\dots,(x_{k(\mathrm{Nnreff},i,n)},y_{k(\mathrm{Nnreff},i,n)})). \quad (3.22)$$

При цьому кількість N_{nreff} вказаних вимірювань може бути меншою ніж кількість кандидатів на зорі порівняння ($N_{\mathrm{nref}\,f}\le N_{\mathrm{ref}\,f}$). Одночасно з формуванням позиційних вимірювань формуються оцінки півширини (FWHM) Δ_{FWHM} та відношення сигнал/шум q зображень кандидатів на зорі порівняння і досліджуваних зір. Так, оцінки півширини (FWHM) Δ_{FWHM} і відношення сигнал/шум q зображень j-го кандидата на зорі порівняння у серії кадрів складають множини:

$$\Omega_{\mathrm{FWHMj}}=(\Delta_{1(j,i,1)\mathrm{FWHM}},\dots,\Delta_{k(j,i,n)\mathrm{FWHM}},\dots,\Delta_{\mathrm{Njmea}(j,i,\mathrm{Nfr})\mathrm{FWHM}}), \quad (3.23)$$

$$\Omega_{\mathrm{qj}}=(q_{1(j,i,1)},\dots,q_{k(j,i,n)},\dots,q_{\mathrm{Njmea}(j,i,\mathrm{Nfr})}), \quad (3.24)$$

де $q_{k(j,i,n)}$,$\Delta_{k(j,i,n)\mathrm{FWHM}}$ – оцінки відношення сигнал/шум і півширини зображення j-го кандидата на зорю порівнянняn-го кадру серії, яка є k-м вимірюванням

серії.

Аналогічна сукупність оцінок для досліджуваної зорі, має вигляд:

$$\Omega_{\mathrm{FWHMVS}} = (\Delta_{1(i,1)\mathrm{FWHM}}, \dots, \Delta_{\mathrm{kvs}(i,n)\mathrm{FWHM}}, \dots, \Delta_{\mathrm{NVSmea}(i,\mathrm{Nfr})\mathrm{FWHM}}), \quad (3.25)$$

$$\Omega_{\mathrm{qVS}} = (q_{1(i,1)}, \dots, q_{\mathrm{kvs}(i,n)}, \dots, q_{\mathrm{NVSmea}(i,\mathrm{Nfr})}). \quad (3.26)$$

де $q_{\mathrm{kvs}(i,n)}$,$\Delta_{\mathrm{kvs}(i,n)\mathrm{FWHM}}$ – оцінки відношення сигнал/шум і півширини зображення n-го кадру серії зображень досліджуваної зорі, яке є k-м вимірюванням серії. Сукупність даних оцінок для всіх кандидатів на зорі порівняння n-го кадру серії має вигляд:

$$\Omega_{\mathrm{FWHMn}} = (\Delta_{k(1,i,n)\mathrm{FWHM}}, \dots, \Delta_{k(j,i,n)\mathrm{FWHM}}, \dots, \Delta_{k(\mathrm{Nnreff},i,n)\mathrm{FWHM}}), \quad (3.27)$$

$$\Omega_{\mathrm{qn}} = (q_{1(1,i,n)}, \dots, q_{k(j,i,n)}, \dots, q_{k(\mathrm{Nnref},i,\mathrm{Nfr})}). \quad (3.28)$$

При визначенні апертурної яскравості зображень зір використовуються оцінки півширини $\bar{\Delta}_{\mathrm{nFWHM}}$ зображень зір n-го ПЗЗ-кадру серії, як середнього арифметичного оцінок півширини кандидатів на зорю порівняння:

$$\bar{\Delta}_{\mathrm{nFWHM}} = \frac{1}{N_{\mathrm{nreff}}} \sum_{j=1}^{\mathrm{Nnreff}} \Delta_{k(j,i,n)\mathrm{FWHM}}, \quad (3.29)$$

і середнє значення півширини $\bar{\Delta}_{\mathrm{FWHM}}$ зображень зір на кадрах серії:

$$\bar{\Delta}_{\mathrm{FWHM}} = \frac{1}{N_{\mathrm{fr}}} \sum_{n=1}^{N_{\mathrm{fr}}} \bar{\Delta}_{\mathrm{nFWHM}}. \quad (3.30)$$

Визначення радіуса апертури фотометрії проводиться одним з чотирьох способів: в автоматичному режимі; за середнім значенням півширини зображень зорі на кадрах серії; по середньому радіусу зображення зорі, яка досліджується, на кадрах серії або шляхом задання найкращого радіуса апертури користувачем. Даний спосіб вибирає спостерігач при виборі параметрів обчислювальних методів, які використовуються.

Визначення найкращого радіуса апертури фотометрії в автоматичному режимі. Вибір найкращого радіуса апертури виконується на підставі аналізу статистичних характеристик оцінок блиску зір з множини кандидатів на зорі порівняння. Вибір найкращого радіуса апертури фотометрії в автоматичному режимі здійснюється з використанням

сукупності таких операцій.

1. Визначення середніх значень відношення сигнал/шум зорі, яка досліджується, $\bar{q}_{\text{VS}}$ і кожного кандидата на зорю порівняння $\bar{q}_j$ серед усіх кадрів серії і середнього значення відношення сигнал/шум $\bar{q}_n$ всіх кандидатів на зорі порівняння кожного кадру серії:

$$\bar{q}_{\text{VS}} = \frac{1}{N_{\text{VSmea}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{VSmea}}} q_{\text{kvs}(i,n)}; \tag{3.31}$$

$$\bar{q}_j = \frac{1}{N_{\text{jmea}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{jmea}}} q_{k(j,i,n)}; \tag{3.32}$$

$$\bar{q}_n = \frac{1}{N_{\text{nreff}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{nreff}}} q_{k(j,i,n)}. \tag{3.33}$$

2. Призначення двох контрольних зір порівняння, найбільш близьких за значенням оцінки відношення сигнал/шум до зорі, яка досліджується. Контрольними зорями вважаються два кандидати на зорі порівняння з найменшими різницями між середніми значеннями відношення сигнал/шум $\bar{q}_j$(3.32) і середнім значенням відношення сигнал/шум $\bar{q}_{\text{VS}}$ (3.31) зорі, яка досліджується.

3. Задання множини контрольних кадрів Ξ_{check}, на яких визначається радіус апертури контрольних зір. Якщо кількість кадрів серії N_{fr} менша від заданої кількості контрольних кадрів N_{check}, то кількість контрольних кадрів N_{check} дорівнює кількості кадрів серії N_{fr}. Якщо кількість кадрів серії N_{fr} більша N_{check}, то в множину контрольних кадрів Ξ_{check} включаються N_{check} кадри серії, на яких середнє значення (3.33) відношення сигнал/шум $\bar{q}_n$ всіх кандидатів на зорі порівняння мають найбільше значення.

4. Для визначення найкращого радіуса апертури фотометрії R_{apr} на серії кадрів, задається N_{Rstep} допустимих значень радіуса апертури фотометрії $R_{l\,\text{apr}}$ в діапазоні від $0{,}5 \cdot \bar{\Delta}_{\text{FWHM}}$ до $3 \cdot \bar{\Delta}_{\text{FWHM}}$ пікселів. Допустимі значення радіуса апертури фотометрії $R_{l\,\text{apr}}$ визначаються виразом:

$$R_{l\,\text{apr}} = k_0 \bar{\Delta}_{\text{FWHM}} + l\Delta_{\text{step}}, \tag{3.34}$$

де $k_0 = 0{,}5$ – константа, яка визначає початкове значення допустимих радіусів

апертури фотометрії;

$\Delta_{\text{step}} = k_{\text{step}}\bar{\Delta}_{\text{FWHM}}$ – крок зміни допустимих радіусів апертури фотометрії;

$k_{\text{step}} = 0{,}1$ – константа, яка визначає крок зміни допустимих радіусів апертури фотометрії; $l = \overline{0, N_{\text{Rstep}} - 1}$ – номер допустимого значення радіуса апертури фотометрії; $N_{\text{Rstep}} = 3 \cdot \bar{\Delta}_{\text{FWHM}}/\Delta_{\text{step}}$ – кількість допустимих значень радіуса апертури фотометрії.

5. Для кожного допустимого значення радіуса апертури фотометрії $R_{l\,\text{apr}}$ виконується наступна послідовність операцій.

5.1. Для кожної з двох контрольних зір на n-му контрольному кадрі визначається апертурна яскравість A_{ljn} (див. Визначення апертурної яскравості зображень зір) та інструментальний блиск m_{lIjn}:

$$m_{\text{lIjn}} = -2.5\log\frac{A_{\text{ljn}}}{10^{10}}. \tag{3.35}$$

5.2. Для кожного контрольного кадра серії визначається різниця Δm_{lIn} між значеннями інструментальних блисків (3.35) двох контрольних зір на всіх контрольних кадрах (кадрах контрольної множини Ξ_{check}):

$$\Delta m_{\text{lIn}} = m_{\text{lI1}n} - m_{\text{lI2}n}. \tag{3.36}$$

5.3. Для досліджуваного допустимого значення радіуса апертури фотометрії визначається СКВ $\sigma_{l\Delta m}$ різниці між значеннями інструментальних блисків двох контрольних зір на всіх контрольних кадрах:

$$\sigma_{l\Delta m} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{check}}}(\Delta m_{\text{lIn}})^2/(N_{\text{check}} - 1) - \left(\sum_{n=1}^{N_{\text{check}}}\Delta m_{\text{lIn}}/(N_{\text{check}} - 1)\right)^2}. \tag{3.37}$$

6. В якості найкращого радіуса апертури фотометрії R_{apr}, вибирається $l_{\min}$-е допустиме значення радіуса апертури фотометрії $R_{l\,\text{apr}}$, при якому СКВ $\sigma_{l\Delta m}$ різниці між значеннями інструментальних блисків двох контрольних зір на всіх контрольних кадрах мінімальне:

$$R_{\text{apr}} = R_{l\min\,\text{apr}}, \tag{3.38}$$

де $l_{\min} = \arg(\min_{l}(\sigma_{l\Delta m}))$.

Визначення радіуса апертури фотометрії за середнім значенням півширини $\bar{\Delta}_{\mathrm{FWHM}}$ зображень зір (3.30) на кадрах серії виконується відповідно до виразу:

$$R_{\mathrm{apr}} = k_{\mathrm{FWHM}} \bar{\Delta}_{\mathrm{FWHM}} \tag{3.39}$$

де $k_{\mathrm{FWHM}} = 1{,}2 \div 1{,}5$ – коефіцієнт перерахунку середньої півширини зображень зір до радіуса апертури фотометрії.

Визначення радіуса апертури фотометрії за середнім радіусом зображення досліджуваної зорі виконується через сукупність наступних операцій.

1. Для кожного кадра серії визначається радіус зображення досліджуваної зорі R_{VSn} як середня відстань від оцінки положення досліджуваної зорі, на кадрі $Y_{K\mathrm{kvs}(i,n)} = (x_{\mathrm{kvs}(i,n)}; y_{\mathrm{kvs}(i,n)})$ до центра пікселів, які належать до контуру зображення досліджуваної зорі:

$$R_{\mathrm{VSn}} = \frac{1}{N_{\mathrm{VScn}}} \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{VScn}}} \sqrt{(x_{\mathrm{VScn}(j)} - x_{\mathrm{kvs}(i,n)})^2 + (y_{\mathrm{VScn}(j)} - y_{\mathrm{kvs}(i,n)})^2}, \tag{3.40}$$

де $x_{\mathrm{VSxn}(j)}$, $y_{\mathrm{VSxn}(j)}$ – координати центра j-го пікселя контуру зображення досліджуваної зорі на n-му кадрі; N_{VScn} – кількість пікселів контуру зображення досліджуваної зорі на n-му кадрі.

2. Визначення радіуса апертури фотометрії як середнього за кадрами серії радіуса зображення досліджуваної зорі:

$$R_{\mathrm{apr}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{\mathrm{Nfr}} R_{\mathrm{VSn}}. \tag{3.41}$$

Визначення апертурної яскравості зображень зір виконується наступною послідовною сукупністю операцій:

1. Розрахунок середньої яскравості фону зображення зір. Середнє значення яскравості фону $\bar{\Delta}_{\mathrm{gr}\,k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі, який відповідає i-му вимірюванню n-го кадра, визначається множиною $\Psi_{\mathrm{gr}\,k(j,i,n)}$ пікселів фону на кадрі. В розрахунку середньої яскравості фону зображень зір не приймають участь пікселі, які належать сегментам зображень досліджуваної зорі, Ψ_{VSset} і

кандидатів на зорі порівняння Ψ_{jset}. До пікселів фону $\Psi_{\text{gr }k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі, відносяться пікселі, координати центра яких обмежені двома концентричними колами з центром рівним оцінці координат $Y_{Kk(j,i,n)} = (x_{k(j,i,n)}; y_{k(j,i,n)})$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі. Радіуси $R_{C\,\text{out}}$ зовнішнього і $R_{C\,\text{in}}$ внутрішнього кіл залежать від радіуса апертури фотометрії R_{apr} (3.38, 3.39 або 3.41) і визначаються виразами:

$$R_{C\,\text{in}} = R_{\text{apr}} + \Delta_{\text{Rin}}, \tag{3.42}$$

$$R_{C\,\text{out}} = R_{\text{apr}} + \Delta_{\text{Rout}}, \tag{3.43}$$

де Δ_{Rin}, Δ_{Rout} – константи, які визначають внутрішній і зовнішній радіуси області оцінок середньої яскравості фону.

Середнє по пікселях значення яскравості фону $\bar{\Delta}_{\text{gr }k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі визначається виразом:

$$\bar{\Delta}_{\text{gr }k(j,i,n)} = \frac{1}{N_{\text{gr }k(j,i,n)}} \sum_{l=1}^{\text{Ngr }k(j,i,n)} A_{\text{grl }k(j,i,n)}, \tag{3.44}$$

де $A_{\text{gr }l\,k(j,i,n)}$ – яскравість l-го пікселя, які належить множині пікселів фону $\Psi_{\text{gr }k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі; $N_{\text{gr }k(j,i,n)}$ – кількість пікселів фону $\Psi_{\text{gr }k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі.

2. Визначення пікселів, які належать апертурі зображення j-ї зорі на n-му кадрі. Піксель належить апертурі зображення j-ї зорі на n-му кадрі, якщо координати центра пікселя задовольняють умову:

$$\sqrt{(x_l - x_{k(j,i,n)})^2 + (y_l - y_{k(j,i,n)})^2} < R_{\text{apr}} + 1, \tag{3.45}$$

де x_l, y_l – координати центра l-го пікселя апертури.

3. Для кожного пікселя апертури зображення j-ї зорі на n-му кадрі визначається:

3.1. Відносна яскравість l-го пікселя апертури зображення j-ї зорі на n-му кадрі як різниця яскравості l-го пікселя апертури $A_{l\,k(j,i,n)}$ і середньої яскравості фону $\bar{\Delta}_{\text{gr }k(j,i,n)}$ зображення j-ї зорі на n-му кадрі:

$$\Delta A_{l\,k(j,i,n)} = A_{l\,k(j,i,n)} - \bar{\Delta}_{\text{gr }k(j,i,n)}. \tag{3.46}$$

3.2. Відстань від центра поточного l-го пікселя апертури зображення j-ї зорі на n-му кадрі до центра апертури:

$$R_{l\,k(j,i,n)} = \sqrt{(x_l - x_{k(j,i,n)})^2 + (y_l - y_{k(j,i,n)})^2}. \quad (3.47)$$

3.3. Для підвищення точності визначення апертурної яскравості зображень зір на межі апертури використовуються дробові пікселі. Формально, для цього застосовуються коефіцієнти $w_{\Delta \mathrm{Al}\,k(j,i,n)}$ повноти l-го пікселя апертури зображення j-ї зорі на n-му кадрі, який міститься в k-му вимірюванні серії і обчислюються відповідно до виразів:

$$w_{\Delta \mathrm{Al}\,k(j,i,n)} = \{1, \text{при } R_{\mathrm{apr}} - R_{l\,k(j,i,n)} > 1 \mid \{k_{\mathrm{sq}}, \text{при } 0 < R_{\mathrm{apr}} - R_{l\,k(j,i,n)} < 1 \mid , \quad (3.48)$$

де $k_{\mathrm{sq}} = \frac{N_{\mathrm{Apxl}}}{N_{\mathrm{Spxl}}}$ (3.49)

– дробова частина пікселя, який покривається апертурою; N_{Spxl} – загальна кількість субпікселів на які ділиться піксель; N_{Apxl} – кількість субпікселів, які покриваються апертурою.

4. Обчислення апертурної яскравості A_{jn} зображення j-ї зорі на n-му кадрі як суми добутків коефіцієнтів $w_{\Delta \mathrm{Al}\,k(j,i,n)}$ повноти і відносних яскравостей $\Delta A_{l\,k(j,i,n)}$ пікселів апертури зображення j-ї зорі на n-му кадрі:

$$A_{\mathrm{jn}} = \sum_{l=1}^{\mathrm{Na}\,k(j,i,n)} w_{\Delta \mathrm{Al}\,k(j,i,n)} \cdot \Delta A_{l\,k(j,i,n)}, \quad (3.50)$$

де $N_{a\,k(j,i,n)}$ – кількість пікселів в апертурі зображення j-ї зорі на n-му кадрі.

Визначення інструментального блиску досліджуваної зорі та кандидатів на зорю порівняння. Обчислення інструментальних блисків досліджуваної зорі та кандидатів на зорі порівняння кадрів серії за відомими апертурними ярскравостями (3.50) кандидатів на зорі порівняння A_{jn} і досліджувані зорі, A_{VSn} виконується відповідно до виразів:

$$m_{I\,\mathrm{jn}} = -2.5\log\frac{A_{\mathrm{jn}}}{10^{10}}; \quad (3.51)$$

$$m_{I\,\mathrm{VSn}} = -2.5\log\frac{A_{\mathrm{VSn}}}{10^{10}}. \quad (3.52)$$

При проведенні досліджень константи, визначальні внутрішній Δ_{Rin} і зовнішній Δ_{Rout} радіуси області оцінки фону приймалися рівними: $\Delta_{\mathrm{Rin}} = 15$ і $\Delta_{\mathrm{Rout}} = 20$ пікселів.

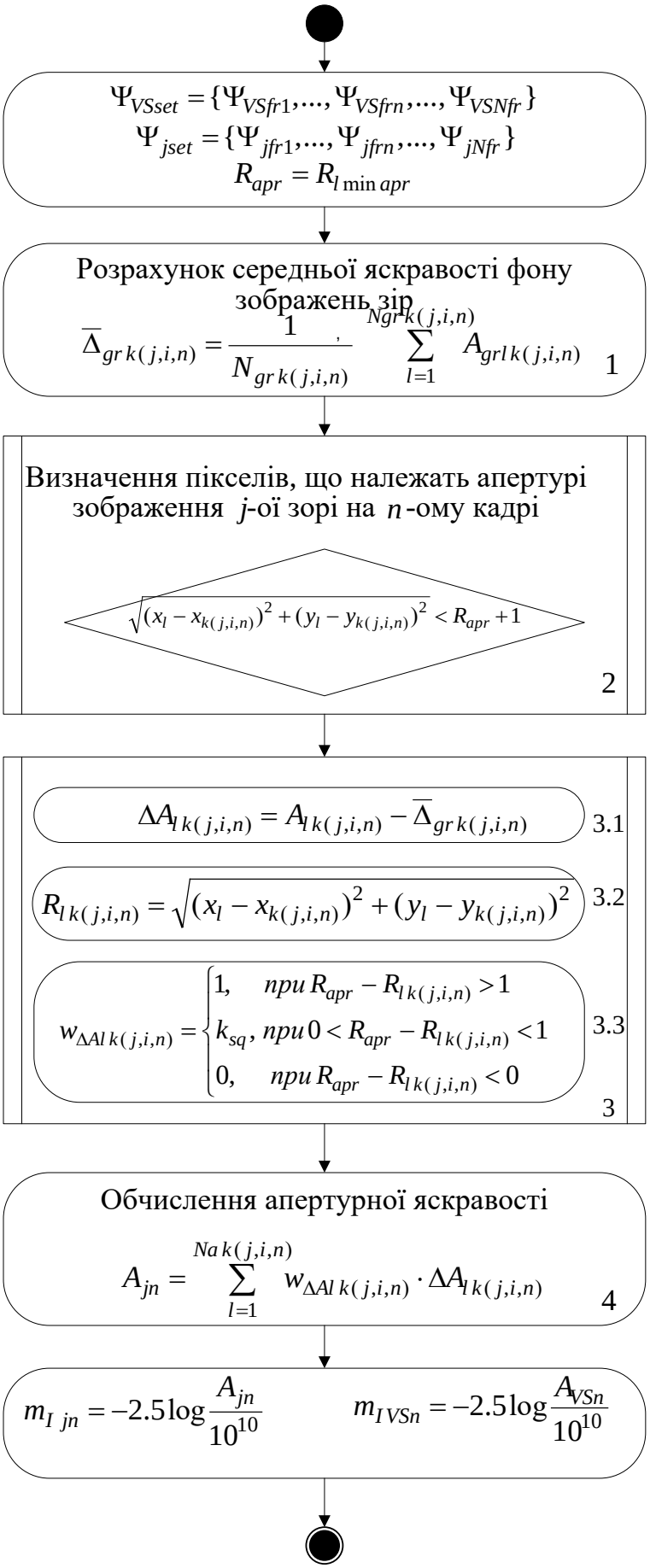


Рис. 3.1. UML-діаграма обчислювального методу оцінки апертурної яскравості і інструментального блиску досліджуваної зорі та зір порівняння

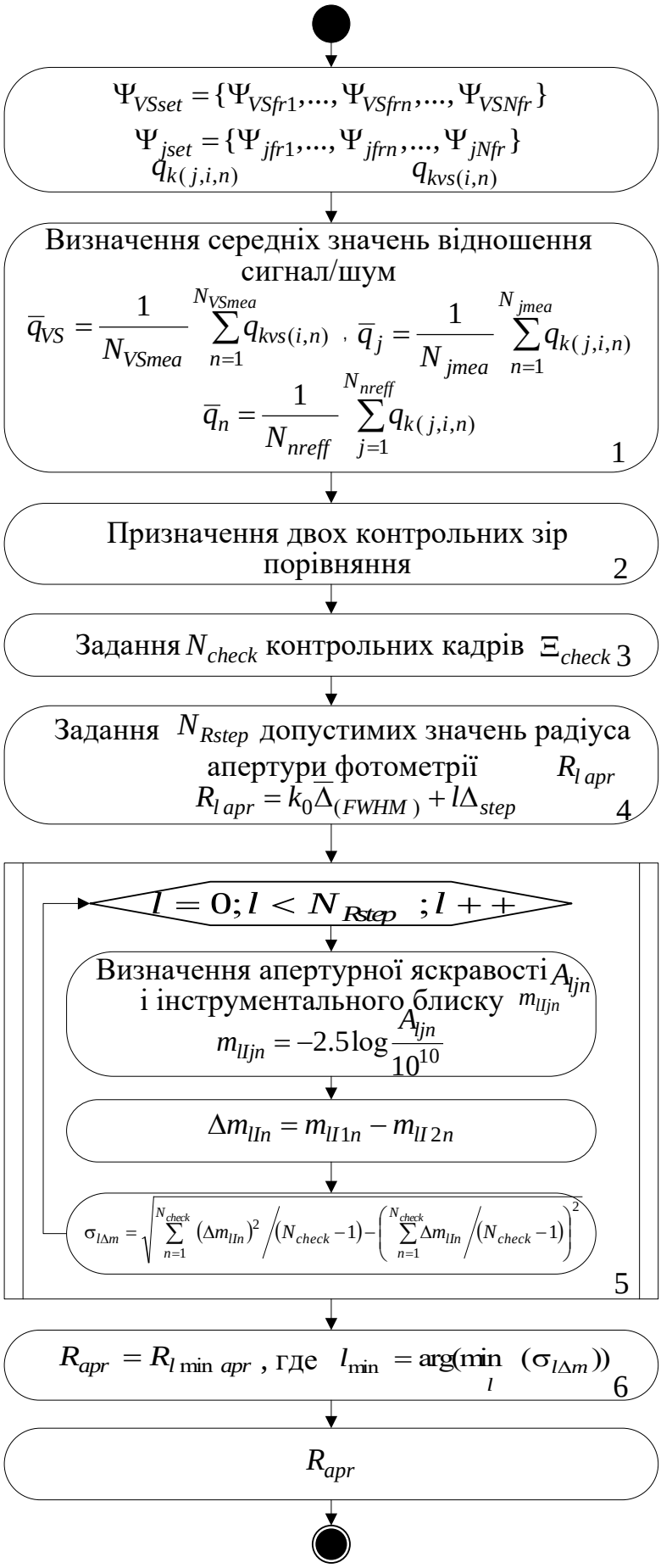


Рис. 3.2. UML-діаграма обчислювального методу оцінки найкращого радіуса апертури фотометрії в автоматичному режимі

3.3. Обчислювальний метод оцінки блиску небесних об'єктів на кадрах серії

Постановка задачі. Задано N_{fr} кадрів, які складають серію:

$$\Xi_{\text{set}} = \{\Xi_{\text{fr}1}, \dots, \Xi_{\text{frn}}, \dots, \Xi_{\text{Nfr}}\}, \tag{3.53}$$

де Ξ_{frn} – n-й ПЗЗ-кадр серії.

Досліджувана зоря задана спостерігачем або автоматично, $N_{\text{ref}\,f}$ кандидатів на зорі порівняння $\Omega_{\text{ref}\,f}$. На кадрах серії задана сукупність інструментальних блисків і апертурних яскравостей досліджуваної зорі:

$$\Omega_{\text{mVS}} = (m_{I\,\text{VS1}}, \dots, m_{I\,\text{VSn}}, \dots, m_{I\,\text{VS Nfr}}), \tag{3.54}$$

$$\Omega_{\text{AVS}} = (A_{\text{VS1}}, \dots, A_{\text{VSn}}, \dots, A_{\text{VS Nfr}}), \tag{3.55}$$

і кандидатів на зорі порівняння (для $j = \overline{1, N_{\text{ref}\,f}}$):

$$\Omega_{\text{mj}} = (m_{I\,j1}, \dots, m_{I\,\text{jn}}, \dots, m_{I\,\text{jNfr}}), \tag{3.56}$$

$$\Omega_{\text{Aj}} = (A_{j1}, \dots, A_{\text{jn}}, \dots, A_{\text{jNfr}}), \tag{3.57}$$

де $m_{I\,\text{VSn}}$, $m_{I\,\text{jn}}$ – інструментальний блиск досліджуваної зорі та j-го кандидата на зорі порівняння n-го кадру серії відповідно; $N_{\text{ref}\,f}$ – кількість кандидатів на зорі порівняння; N_{fr} – кількість ПЗЗ -кадрів серії; A_{VSn}, A_{jn} – апертурна яскравість досліджуваної зорі, j-го кандидата на зорі порівняння n-го кадру серії відповідно.

Необхідно знайти блиск досліджуваної зорі для кожного ПЗЗ-кадра серії:

$$\Omega_{\text{VS}} = (m_{\text{VS1}}, \dots, m_{\text{VSn}}, \dots, m_{\text{VS Nfr}}), \tag{3.58}$$

де $m_{\text{VS}n}$ – блиск досліджуваної зорі на n-му кадрі серії. Для цього вводиться базовий кадр, наприклад, перший кадр серії, – це кадр, на який перераховується інструментальний блиск усіх зір всіх кадрів.

Обчислювальний метод побудови кривої блиску (оцінки блиску досліджуваної зорі на кадрах заданої серії) складається з такої послідовності операцій.

1. Для компенсації вимірювання умов спостереження від кадра до кадру серії, проводиться редукція інструментального блиску всіх кандидатів на зорі порівняння і досліджувані зорі, відносно базового кадра.

1.1 Обчислюється коефіцієнт η_n редукції інструментального блиску n-го кадра на базовий:

$$\eta_n = \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ref}\,f}} m_{\mathrm{Ijn}} / \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ref}\,f}} m_{\mathrm{IBj}}, \tag{3.59}$$

де m_{IBj} – інструментальний блиск j-го кандидата на зорі порівняння базового кадру.

1.2. Редукція інструментального блиску m_{Ijn} $(j = \overline{1, N_{\mathrm{ref}\,f}})$ всіх кандидатів на зорі порівняння і досліджувані зорі з n-го кадра на базовий кадр відповідно до виразів:

$$m_{\mathrm{IRjn}} = \frac{m_{\mathrm{Ijn}}}{\eta_n}, \tag{3.60}$$

$$m_{\mathrm{IRVSn}} = \frac{m_{\mathrm{IVSn}}}{\eta_n}. \tag{3.61}$$

2. Виявлення аномальних помилок значень редукованого інструментального блиску кандидатів на зорі порівняння. Апертурна яскравість A_{jn} j-го кандидата на зорі порівняння n-го кадру може містити аномальну помилку. Отже, дану помилку містить редукований інструментальний блиск m_{IRjn}. З метою виключення з кандидатів на зорі порівняння зір з аномальними помилками редукованого інструментального блиску m_{IRjn}, для кожного кандидата на зорі порівняння і кадра серії виконується наступна послідовність дій.

2.1. Для n-го кадра, який досліджується, вибирається вікно кадрів, яке є поточною підмножиною кадрів серії Ξ_{fr} і складається з непарної множини $M+1$ кадрів. Для перших і останніх $M/2+1$ кадрів серії множини Ξ_{fr} , вікно кадрів буде складатися з $M+1$ кадрів з номерами $\overline{1, M+1}$ і $\overline{N_{\mathrm{fr}} - M, N_{\mathrm{fr}}}$

відповідно. Для інших кадрів, з номерами $n = \overline{M+1, N_{\text{fr}} - M}$, вказане вікно кадрів також складається з непарної множини $M+1$ кадрів і при цьому центральний кадр вікна має номер n.

2.2. Для виявлення аномальної помилки редукованого інструментального блиску j-го кандидата на зорі порівняння кожного кадру серії оцінюється середнє та СКВ редукованого інструментального блиску даної зорі у вікні досліджуваних кадрів.

2.2.1. Значення редукованого інструментального блиску j-го кандидата на зорі порівняння в $M+1$ кадрах досліджуваного вікна сортуються. Відкидаються кадри, які відповідають 10% самих великих і 10% самих малих значень редукованого інструментального блиску j-го кандидата на зорі порівняння. Ті кадри, які залишилися після відбракування N_W кадрів, складають множину Ξ_{Wn}.

2.2.2. На множині кадрів поточного вікна Ξ_{Wn} обчислюються середнє $\bar{m}_{\text{IRjn}}$ і СКВ σ_{jn} редукованого інструментального блиску j-го кандидата на зорі порівняння відповідно до виразів:

$$\bar{m}_{\text{IRjn}} = \frac{1}{N_W} \sum_{n=1}^{N_W} m_{\text{IRjn}}, \tag{3.62}$$

$$\sigma_{\text{jn}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_W} \left(m_{\text{IRjn}}\right)^2 / (N_W - 1) - \left(\sum_{n=1}^{N_W} m_{\text{IRjn}} / (N_W - 1)\right)^2}. \tag{3.63}$$

2.3. З кандидатів на зорі порівняння $\Omega_{\text{ref}\,f}$, виділяється множина допустимих зір порівняння Ω_{reffsel}, редукований інструментальний блиск яких хоча б на одному кадрі серії не має аномальних помилок, тобто, задовольняє умові:

$$\sqrt{\left(m_{\text{IRjn}} - \bar{m}_{\text{IRjn}}\right)^2} \le \gamma \sigma_{\text{jn}}, \tag{3.64}$$

де $\gamma = 2 \div 4$ – коефіцієнт пропорційності.

3. Визначення допустимих кадрів Ξ_{beg}, на яких присутні хоча б дві зорі з множини допустимих зір порівняння Ω_{reffsel}.

4. Визначення інструментального блиску m_{synn} штучної (середньої) зорі порівняння для кожного допустимого кадра як середнього інструментального

блиску m_{ljn} всіх допустимих зір порівняння Ω_{reffsel} даного кадру, наприклад, для n-го допустимого кадра:

$$m_{\text{synn}} = \frac{1}{N_{\text{reffsel}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{reffsel}}} m_{\text{ljn}}. \tag{3.65}$$

5. Автоматичний вибір зір порівняння.

6. В якості шуканих оцінок блиску досліджуваної зорі на кадрах заданої серії (шуканої кривої блиску) приймається блиск досліджуваної зорі (3.63), отримані на ℓ_{min}-й комбінації допустимих зір порівняння з найменшим СКВ $\sigma_{\text{syn}\ell}$ блиску штучної (середньої) зорі (3.65):

$$m_{\text{VS}n} = m_{\text{VS}\ell\text{min}n}, \text{ для } n = \overline{1, N_{\text{fr}}}, \tag{3.66}$$

де $\ell_{\text{min}} = \arg(\min_{\ell}(\sigma_{\text{syn}\ell}))$.

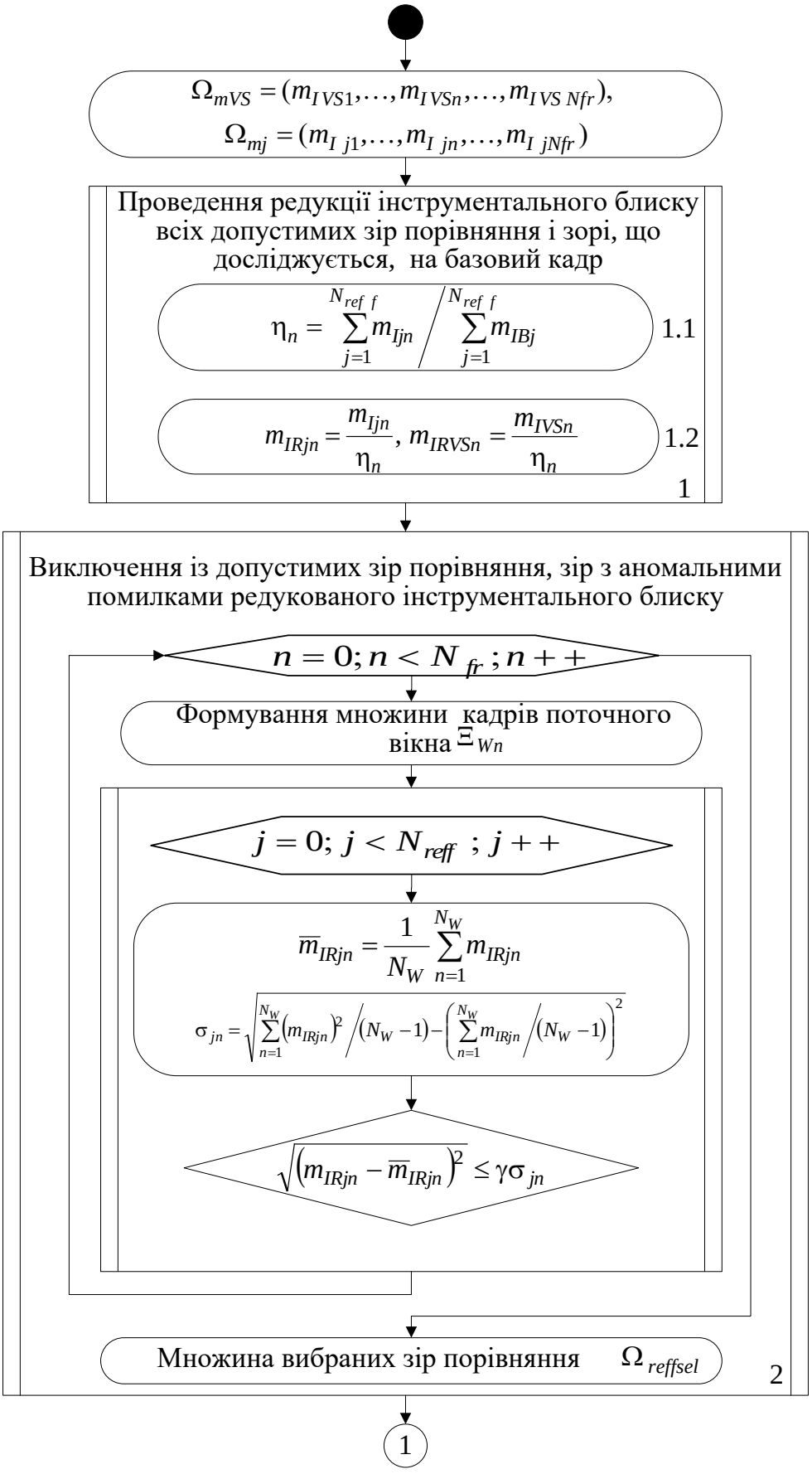


Рисунок 3.3 – UML-діаграма обчислювального методу оцінки кривої блиску зорі, що досліджується

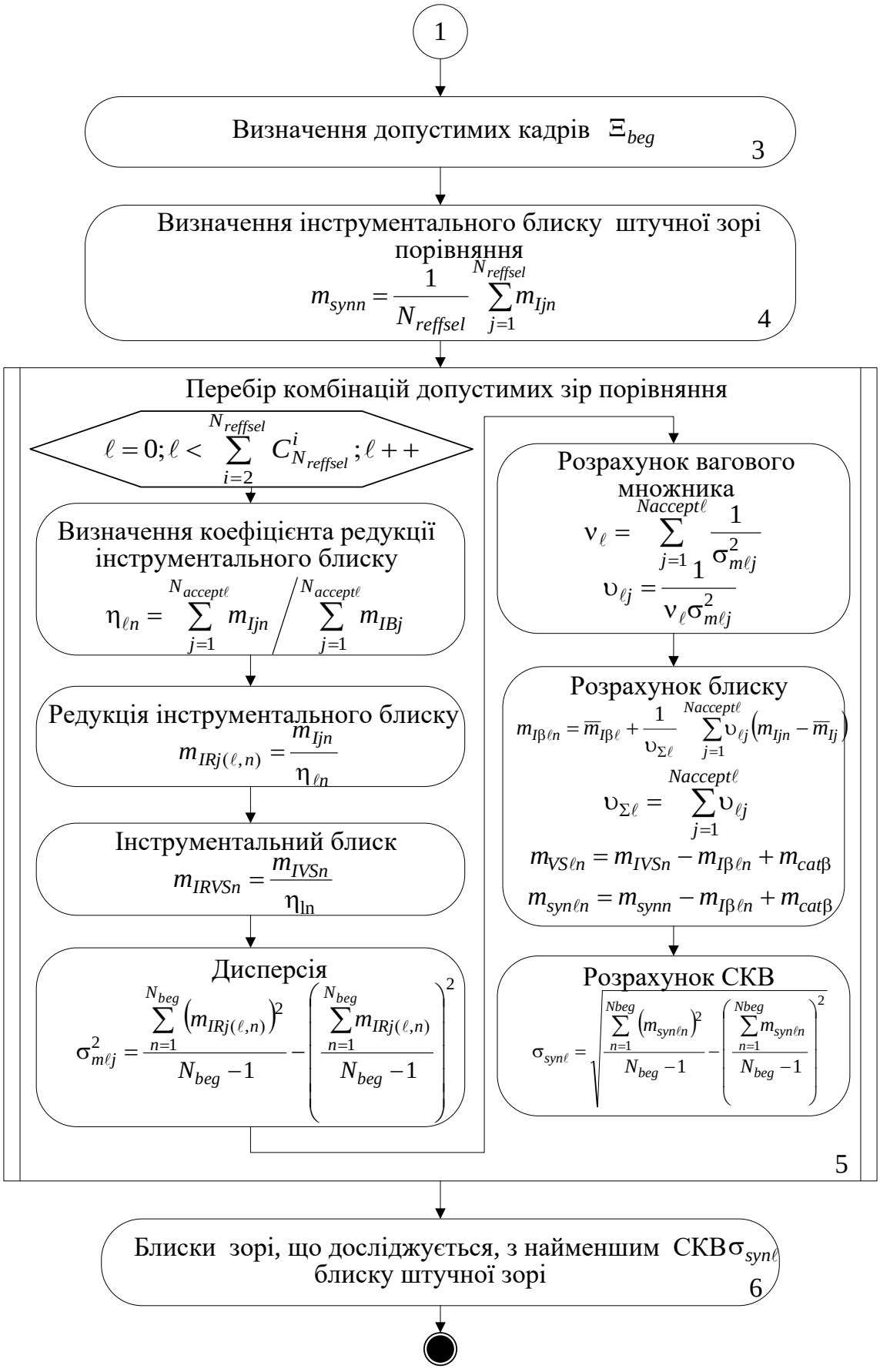


Рисунок 3.4 – UML-діаграма обчислювального методу оцінки кривої блиску зорі, що досліджується (продовження)

4 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МЕТОД ВИДІЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ОБЄКТІВ, ЗМАЗАНИХ ВЛАСНИМ РУХОМ

Постановка завдання. Досліджується спостереження об'єкту за допомогою оптичного засобу (телескопа), оснащеного ПЗЗ-матрицею. За результатами спостережень однієї ділянки небесної сфери формується серія з N_{fr} цифрових ПЗЗ-кадрів з часом прив'язки t-го кадру серії τ_t. Один із кадрів серії називається базовим, а час його прив'язки вважається рівним τ_0 (як правило, час прив'язки середнього кадру серії, який відповідає часу половини експозиції вказаного кадру).

Об'єкт з високою кутовою швидкістю (великим видимим рухом - 10 пікселів за час експозиції) на ПЗЗ кадрах має витягнуте зображення, іншими словами, зображення, змазане власним рухом. Цим об'єктом може бути або астероїд, який зближується із Землею, або метеор, або інший небесний об'єкт з великим видимим рухом на серії кадрів N_{fr}.

Попередні дослідження показують, що на етапі виявлення в якості моделі видимого руху об'єкту з високою кутовою швидкістю досить використати лінійну модель з незалежним видимим рухом об'єкта уздовж кожної координати:

$$x_t = x_0 + V_x(\tau - \tau_0); \tag{4.1}$$

$$y_t = y_0 + V_y(\tau - \tau_0), \tag{4.2}$$

де τ – час; τ_0 – час прив'язки базового кадра; V_x, V_y – швидкість об'єкта за координатами x і y відповідно; x_t, y_t – координати зображення об'єкта на момент τ; x_0, y_0 – положення протяжного об'єкта на час τ_0 прив'язки базового кадра.

Необхідно на серії кадрів, які досліджується, виявити витягнуті зображення (зображення об'єктів, змазаних власним рухом).

Суть методу виділення зображення об'єкта, змазаного власним рухом. На жаль, вирішити це завдання з прийнятною якістю виявлення за даними одного кадра (на етапі внутрішньокадрової обробки) не вдається. У зв'язку з цим в роботі задача вирішується в три етапи, один з яких відповідає внутрішньокадровій обробці, а два інших - міжкадровій.

Етап 1. При внутрішньокадровій обробці виділяються зображення, які мають ознаки протяжних.

Етап 2. Із множини протяжних зображень, виділених на першому етапі, виключаються ті, які містять хоч би два кругові зображення відомих зірок або зірок, які потрапили у сформований внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів.

Етап 3. Витягнуті зображення (по одному на кожному кадрі) об'єднуються в серію протяжних зображень одного гіпотетичного об'єкту з використанням методу класу стробових. По закінченню приймається рішення про наявність зображень об'єктів, змазаних власним рухом.

Селективні ознаки зображення витягнутого об'єкту на етапі внутрішньокадрової обробки.

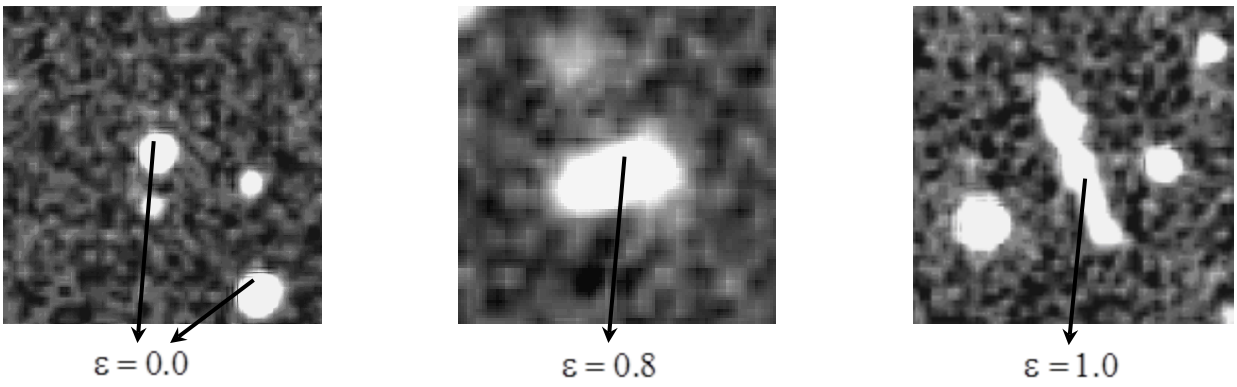


Рис. 4.1. Приклади зображень об’єктів (від кругових до витягнутих)

Зображення об'єктів небесних тіл на ПЗЗ-кадрі мають різну форму. Для виявлення об'єкта з витягнутим зображенням на дискретному зображенні кадру в роботі використана характеристика його витягнутості. В якості міри витягнутості зображення об'єкта в роботі використовується оцінка його

ексцентриситету $\hat{\varepsilon}$. Значення ексцентриситету змінюється в діапазоні від 0 до 1. Він дорівнює нулю, якщо зображення об'єкта має форму круга, і одиниці для зображення об'єкта у формі лінії [134] (Рис. 4.1, таблиця.4.1).

Таблиця 4.1 – Значення ексцентриситету зображень відносно співвідношення довжин їх осей

Відношення осей зображень	$\hat{\varepsilon}$
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

Оцінка витягнутості і орієнтації зображення об'єкта. Оцінку ексцентриситету зображення об'єкта в даному випадку зручно виражати через оцінки центральних моментів другого порядку [134, 135].

Для визначення ексцентриситету спочатку необхідно оцінити моменти першого порядку [134, 135]:

$$X_0 = \frac{\sum\limits_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt} x_{it}}{\sum\limits_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt}} \quad ; \qquad Y_0 = \frac{\sum\limits_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt} y_{kt}}{\sum\limits_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt}}, \tag{4.3}$$

де x_{it}, y_{kt} – координати центру *ik*-го пікселя *t*-го кадра ПЗЗ-матриці.

Крім того, необхідно знайти моменти другого порядку:

$$m_{20} = \sum_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt} \left(x_{it} - X_0\right)^2, \tag{4.4}$$

$$m_{02} = \sum_{i,k=0}^{N_{IPSs}} A^*_{ikt} \left(y_{kt} - Y_0\right)^2, \tag{4.5}$$

$$m_{11} = \sum_{i=0}^{N_{IPSs}} \sum_{k=0}^{N_{IPSs}} A_{ikt}^{*}(x_{it} - X_0)(y_{kt} - Y_0). \quad (4.6)$$

На основі отриманих даних можна обчислити оцінку ексцентриситету [134, 135]:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02} + 4m_{11}^2)}}. \quad (4.7)$$

Перевірка приналежності витягнутого зображення об'єктам внутрішнього каталогу з відповідним відбраковуванням (відбраковування зображень близьких зір). На етапі внутрішньокадрової обробки були виділені витягнуті зображення (зображення, які імовірно відповідають зображенням об'єктів, змазаних власним рухом). Для цього передбачалося, що об'єкт є витягнутим ($\varepsilon_{kr} \geq 0.7$) і значення ВСШ $q_{kr} \geq 50$. ВСШ визначалося відповідно до виразу у розділі 3, а витягнутість – ексцентриситетом (4.7).

На етапі міжкадрової обробки ототожнюються кадри серії з формулярами зоряного каталогу і формується внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів, які досліджується.

На базі пікселів, віднесених до витягнутих зображень на етапі внутрішньокадрової обробки, також можуть бути сформовані кругові зображення об'єктів, які не змазані власним рухом. На одному кадрі зображення кластерів з декількох зір, які вишикувалися в лінію (рис. 4.2а, 4.2б), нічим не відрізняються від зображень об'єктів, змазаних власним рухом (рис. 4.2в). За даними круговими зображеннями формується оцінка положення передбачуваних об'єктів [113]. Сукупність усіх сформованих на кадрі вимірювань використовується для формування внутрішнього каталогу об'єктів, нерухомих на серії, яка досліджується. Після цього з множини витягнутих зображень виключаються ті, які включають хоча б два кругові зображення відомих зір (зір, ототожнених з астрометричним і

фотометричним каталогами, які для цього використо-вуються) або зір, які потрапили у сформований внутрішній каталог об'єктів, нерухомих на серії кадрів. При цьому, вважається, що j-е витягнуте зображення містить у собі кругове зображення l-го об’єкта внутрішнього каталогу, об’єктів, нерухомих на серії кадрів, якщо оцінки координат x_l y_l цього об’єкту належать області j-го витягнутого зображення, яке досліджується, $x_l \in \Omega_j$, $y_l \in \Omega_j$ (де l і j номера об’єктів на кадрі, який досліджується).

Виявлення зображення об'єкта, змазаного власним рухом. Після операцій внутрішньокадрової і міжкадрової обробки першого і другого етапів методу виділення зображень об'єктів, змазаних власним рухом, залишається дуже мало зображень, які відповідають істинним і неправдивим об'єктам. Це дозволяє для вказаного вище об'єднання використати метод класу стробових.

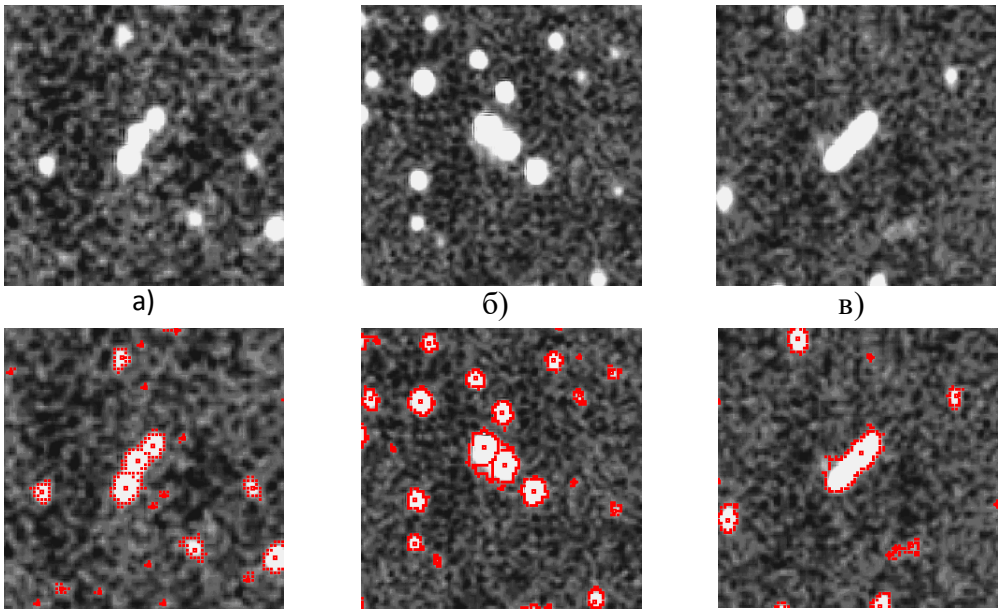


Рис. 4.2. Зображення об'єктів, змазаних власним рухом

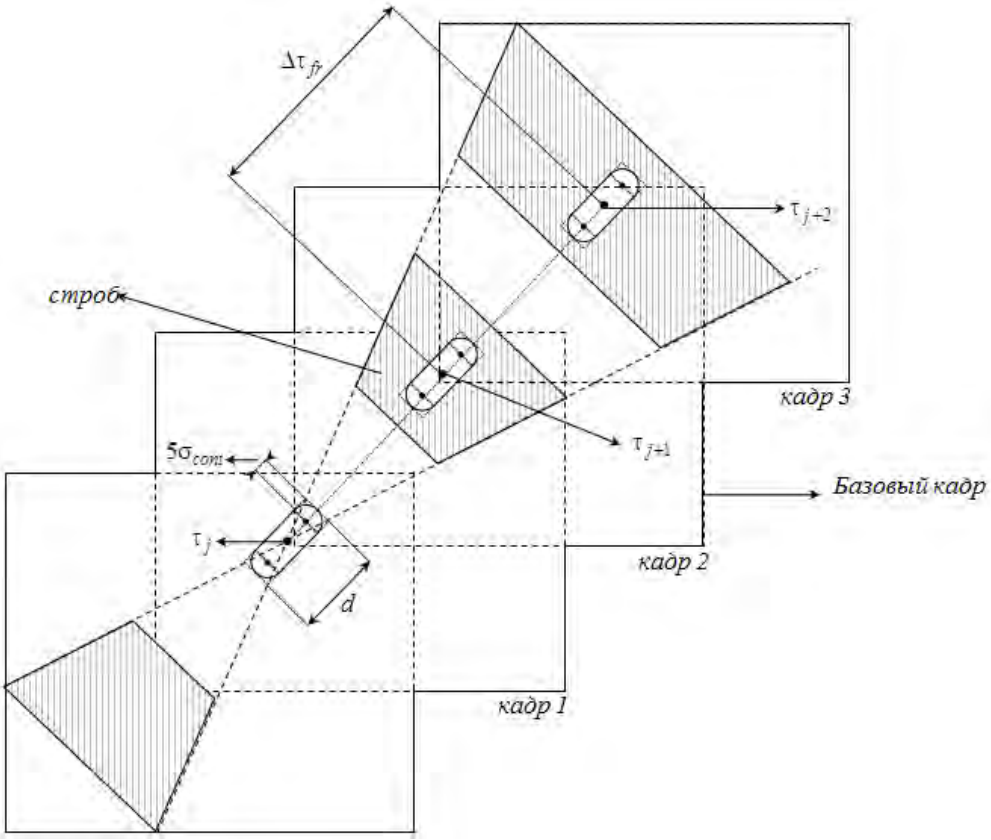


Рис. 4.3. Серія кадрів з витягнутим зображенням об’єкта

Для реалізації стробового методу (Рис.4.3) об'єднання витягнутих зображень в серії слід виконати наступну послідовність операцій.

1. Чергове витягнуте зображення поточного кадру перевіряється на приналежність до вже сформованих стробів об'єктів з великим видимим рухом.

1.1 Положення стробів (очікуване/ екстрапольоване положення об'єкта) визначаються відповідно до лінійної моделі видимого руху об'єкту :

$$\hat{x}_{et} = \hat{x}_0 + \hat{V}_x(\tau - \tau_0), \tag{4.8}$$

$$\hat{y}_{et} = \hat{y}_0 + \hat{V}_y(\tau - \tau_0), \tag{4.9}$$

де $\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_{x\max}, \hat{\theta}_{x\min}, \hat{\theta}_{y\max}, \hat{\theta}_{y\min})$ – параметри видимого руху.

Межі стробів визначаються виразами:

$$\overset{*}{x}_{\min t}(\hat{\theta}_{x\min}) = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\min x}\Delta_{\tau fr}, \tag{4.10}$$

$$\overset{*}{x}_{\max t}(\hat{\theta}_{x\max}) = \hat{x}_0 + \hat{V}_{\max x}\Delta_{\tau fr}, \tag{4.11}$$

$$\overset{*}{y}_{\min t}(\hat{\theta}_{y\min}) = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\min y}\Delta_{\tau fr}, \tag{4.12}$$

$$\overset{*}{y}_{\max t}(\hat{\theta}_{y\max}) = \hat{y}_0 + \hat{V}_{\max y}\Delta_{\tau fr}. \tag{4.13}$$

де $\hat{\theta}_{x\max}$, $\hat{\theta}_{x\min}$, $\hat{\theta}_{y\max}$, $\hat{\theta}_{y\min}$ – вектори параметрів видимого руху об'єкта по кожній координаті, які відповідають межам стробів;

$\hat{V}_{\min x}, \hat{V}_{\max x}$, $\hat{V}_{\min y}, \hat{V}_{\max y}$ – оцінки мінімальної і максимальної швидкості витягнутого об'єкта за координатам x і y відповідно:

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

σ_{cont} – СКВ координат меж зображення (СКВ радіуса зображення);

d – довжина шляху (в пікселях), пройденого об'єктом за час експозиції, яка також є довжиною зображення об'єкта;

Δ_τ – час експозиції.

Вектори $\hat{\theta}_{x\max}$, $\hat{\theta}_{x\min}$, $\hat{\theta}_{y\max}$, $\hat{\theta}_{y\min}$ включають в себе координати $\hat{x}_t, \hat{y}_t$ положення об'єкта і його швидкості $\hat{V}_{\min x}, \hat{V}_{\max x}$, $\hat{V}_{\min y}, \hat{V}_{\max y}$ по кожній координаті:

$$\hat{\theta}_{x\max} = \left(\hat{x}_0, \hat{V}_{\max x}\right), \qquad \hat{\theta}_{x\min} = \left(\hat{x}_0, \hat{V}_{\min x}\right); \tag{4.14}$$

$$\hat{\theta}_{y\max} = \left(\hat{y}_0, \hat{V}_{\max y}\right), \qquad \hat{\theta}_{y\min} = \left(\hat{y}_0, \hat{V}_{\min y}\right). \tag{4.15}$$

1.2. Вважається, що зображення протяжного об’єкта потрапило в строб, якщо виконується умова:

$$\begin{aligned} x_{\min et} < \hat{x}_t < x_{\max et}, \\ y_{\min et} < \hat{y}_t < y_{\max et}. \end{aligned} \tag{4.16}$$

1.3. Якщо це зображення потрапляє в один із вказаних стробів, параметри строба уточняються відповідно до параметрів чергового витягнутого зображення, яке потрапило в строб.

2. Для кожного ізольованого витягнутого зображення (витягнутого зображення, яке не потрапило в строби об'єктів з великим видимим рухом, що не включене в серію витягнутих зображень) формується новий строб (Рис. 4.11.). Положення і орієнтація строба визначається кутом зображення і витягнутістю зображення. Для цього використовуються вирази (4.8)(4.9). Розміри строба визначаються показниками якості визначення контурів зображення, показниками точності оцінки параметрів витягнутого зображення та перерахунку координат і орієнтації витягнутих зображень з поточних кадрів на базовий.

3. Об'єкт з великим видимим рухом вважається виявленим (серія витягнутих зображень одного об'єкта з великим видимим рухом вважається сформованою), якщо на N_{fr} кадрах у відповідні строби потрапило m вимірювань, сформованих по витягнутих зображеннях.

Обчислювальний метод виділення (виявлення) зображення об'єктів, змазаних власним рухом (Рис. 4.4)

1) На першому етапі (відповідає внутрішньокадровій обробці) з множини зображень об'єктів на кадрі вибираються ті зображення, які мають селективні ознаки витягнутих зображень ($\varepsilon_{kr} \geq 0.7$, $q_{kr} \geq 50$).

2) Виключення з множини витягнутих вимірювань досліджуваного кадру вимірювань, які відповідають зображенням відомих об'єктів (зір) або зір об'єктів, які потрапили у сформований внутрішній каталог об’єктів,

нерухомих на серії кадрів.

3) Витягнуті зображення (по одному на кожному кадрі) об'єднуються в серію витягнутих зображень одного гіпотетичного об'єкта.

3.1 Перевірка протяжних зображень поточного кадру на приналежність вже сформованим стробам об'єктів з великим видимим рухом (4.16). У разі попадання чергового зображення в один з вказаних стробів - із використанням методу найменших квадратів уточнюються параметри цього строба відповідно до параметрів витягнутого зображення, яке потрапило в строб.

3.2 Для кожного ізольованого витягнутого зображення (яке не потрапило до вже існуючих стробів об'єктів з великим видимим рухом) формується новий строб з параметрами (положенням і розмірами), які визначаються відповідно до виразів (4.8) - (4.13).

3.3 Об'єкт з великим видимим рухом вважається виявленим, якщо на N_{fr} кадрах у відповідні строби попало m вимірювань, сформованих за витягнутими зображеннями.

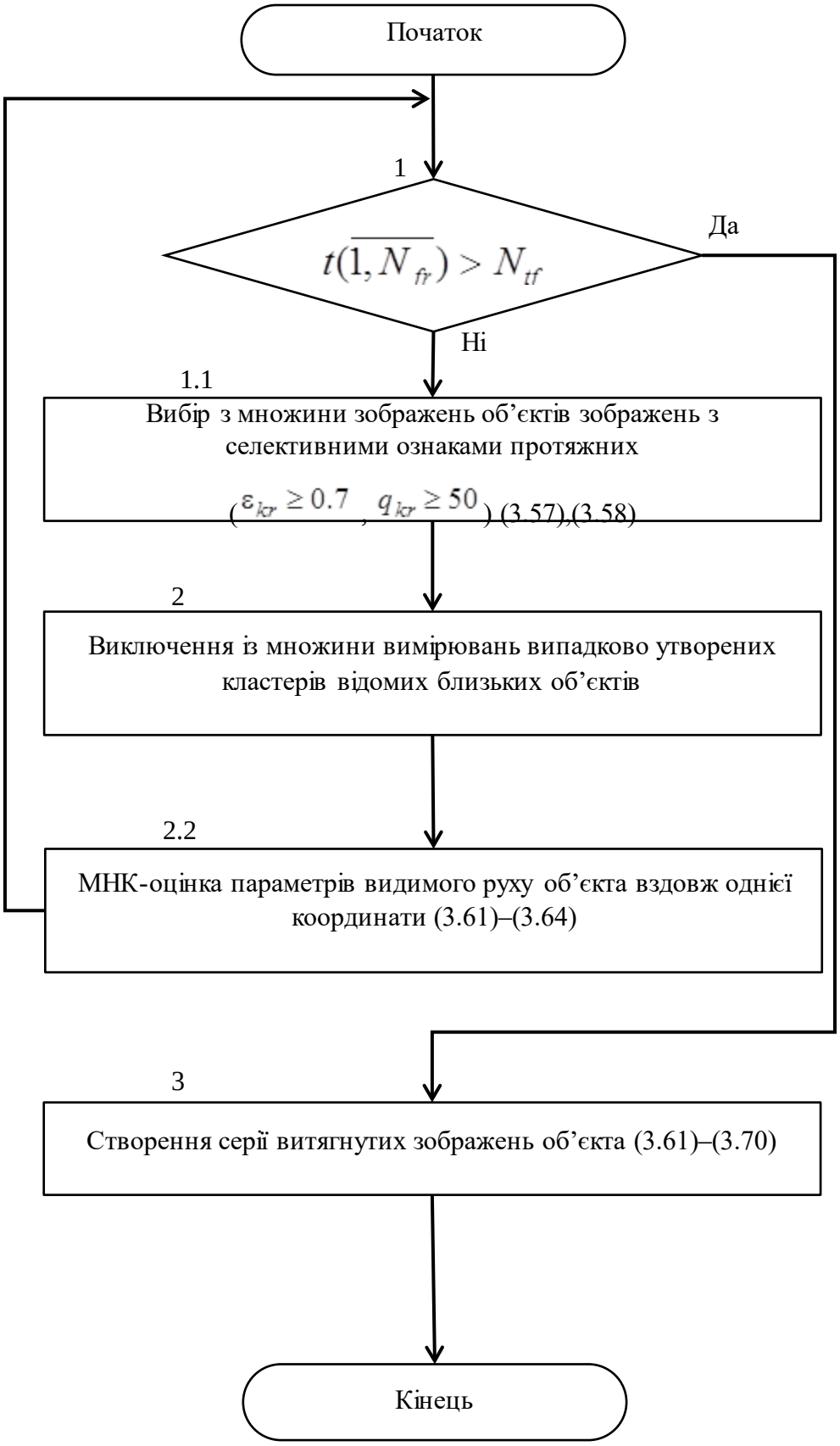


Рис. 4.4. Обчислювальний метод виявлення зображення об'єктів, змазаних власним рухом

5 СТИСЛИЙ ОПИС РОЗРОБКИ ПМЗ СЕРВІСУ, ОБРОБКИ ТА ЗБЕРІГАННЯ ПЗЗ-КАДРІВ ТА ДАНИХ ЇХ ОБРОБКИ

ПМЗ CoLiTec служби обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки – онлайн сервіс обробки астрономічних кадрів, отриманих у режимі добового ведення, а також зберігання даних про результати обробки на сервері.

Основні функції ПМЗ CoLiTec

Внутрішньокадрова обробка:

- Яскравісне вирівнювання кадрів будь-якого розміру (медіанний фільтр і Фур'є-аналіз);
- Автокалібрування та косметична корекція (автоматичне видалення битих і гарячих пікселів);
- Програмне перенесення заряду (ППЗ) - різновид складання кадрів, які використовується для підвищення ВСШ зображень об'єктів з невідомою швидкістю видимого руху;
- Адаптивне формування значень порогів формування міток на кадрах;
- Оцінка координат небесних об'єктів (фітинг).

Міжкадрова обробка:

- Виключення з міжкадрової обробки міток від об'єктів внутрішнього каталогу з нульовим видимим рухом;
- Виявлення астероїдів на основі методу, який дозволяє накопичувати статистики зображень об'єктів уздовж траєкторій з невідомими параметрами руху, за рахунок використання багатозначного перетворення;
- Обчислювальні витрати методу стабілізуються на прийнятному рівні за рахунок ієрархічної реалізації перетворення, яке використовується (автоматичне виявлення слабких рухомих об'єктів (SNR> 2.5));
- Ручне відбракування автоматично виявлених астероїдів;

- Формування рапорту MPC та його відсилка електронною поштою, у тому числі, на NEOCP.

Астрометрична та фотометрична редукція кадрів:

- Повністю автоматизований та надійний алгоритм астрометричної редукції;
- Робота з дуже широким полем зору (до 10 градусів);
- Використання електронних зоряних каталогів USNO B1.0, UCAC5 і XPM;
- Автоматичне виключення аномальних спостережень.

Ототожнення кадрів:

- Формування внутрішнього каталогу об'єктів, нерухомих на серії спостережень;
- Автоматичне ототожнення із зоряним каталогом, як сукупності міток кадру, так і внутрішнього каталогу серії спостережень;
- Автоматичне ототожнення виявлених програмою і відомих MPC об'єктів.

Швидкий старт

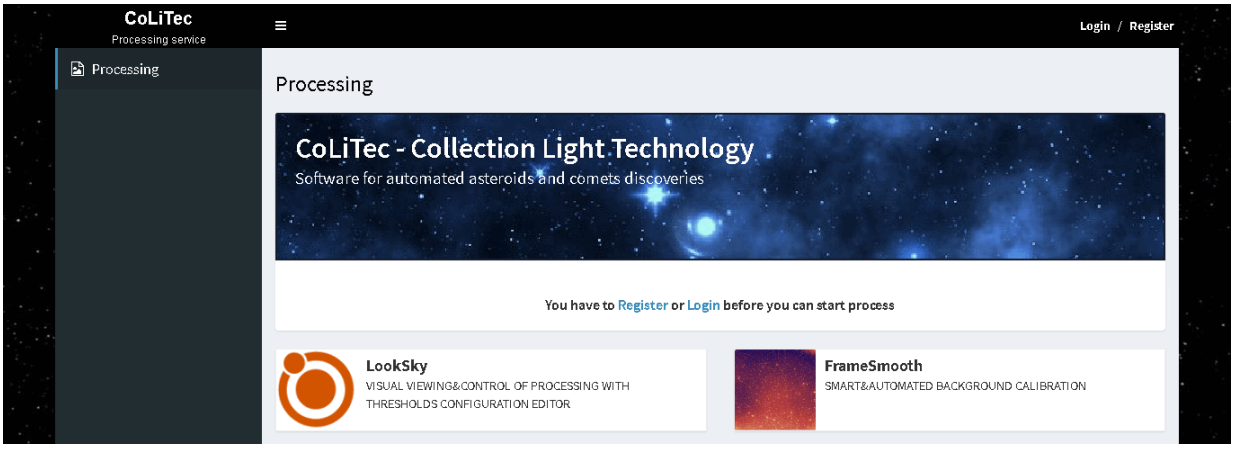


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд стартової сторінки

Для роботи з сервісом необхідно зареєструватися. Для цього заповнити усі необхідні поля (ім'я, прізвище, e- mail адреса, пароль), підтвердити пароль ще раз і натиснути кнопку "Створити аккаунт ".

Після реєстрації для початку роботи з сервісом необхідно натиснути кнопку "Запустити нову обробку". На сторінці, яка відкрилася, необхідно заповнити наступні поля:

- ідентифікатор задачі (обов'язково);
- вибрати налаштування обробки за замовчуванням, або ж якщо є необхідність, можна встановити індивідуальні параметри обробки. Налаштування можна згенерувати редактором налаштувань ThresHolds;
- шляхи до початкових кадрів – завантажені кадри вважаються кадрами однієї серії (належать одній ділянці неба). Кадри мають бути отримані у режимі добового ведення при однакових налаштуваннях телескопа та ПЗЗ матриці;
- шляхи до калібрувальних кадрів – CoLiTec надає можливість калібрувати вихідні (light) кадри за допомогою службових кадрів (bias, dark, flat, dark - flat), а також виконувати яскравісне вирівнювання за допомогою математичного інверсного медіанного фільтру;
- виставити прапорці використання калібрувальних кадрів за типом.

Для запуску обробки необхідно натиснути кнопку "Завантажити" (буде зроблений відкладений старт) або кнопку "Завантажити і почати ".

Після завантаження кадрів (рис. 5.2) буде розпочата обробка.

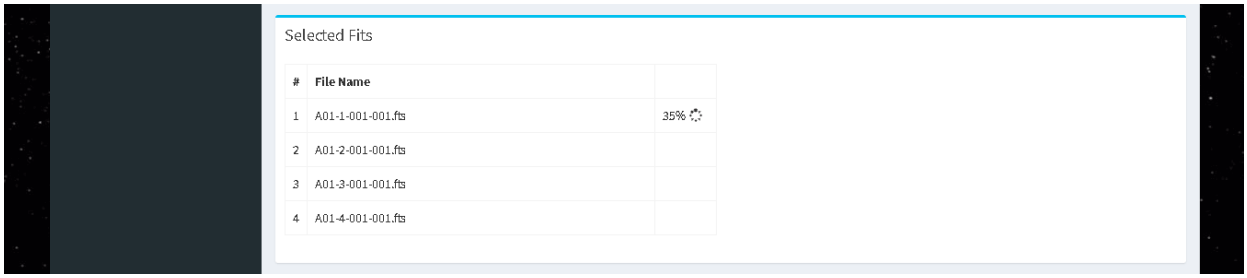


Рис. 5.2. Зовнішній вигляд вікна при завантаженні кадрів

При завантаженні кадрів на сервер виконується контроль вхідних даних, а саме перевіряються усі параметри на відповідність з типом даних і діапазоном значень, що набувають значень.

Під час контролю вхідних параметрів можливі наступні повідомлення:

- *Невірний параметр "XXX" = "УУУ". Обробка неможлива.*
- *Невірно вказаний локальний каталог "XXX" = "ШЛЯХ ДО КАТАЛОГУ".*
- *Файл "УУУ" не знайдено Обробка неможлива.*
- *Невірний E-mail "УУУ". Обробка можлива.*
- *Невірний пароль відправника. Відправка MPC звіту неможлива.*
- *Шлях до "УУУ" не знайдено. Обробка неможлива.*

Під час контролю вхідних даних також виконується перевірка заголовків кадрів. Пріоритет використання параметрів : заголовок кадру - персональні налаштування - WCS із заголовка кадру.

Нижче представлені приклади повідомлень для певного вхідного контролю.

- Перевірка структури кадру на коректність.
- Перевірка наявності обов'язкових для заповнення полів у заголовку кадру: NAXIS, розрядність піксела, ширина та висота кадру, час експозиції, дата і час початку спостереження.
- Перевірка значень обов’язкових для заповнення полів у заголовку кадру.
- Перевірка наявності рекомендованих для заповнення полів у заголовку кадру: екваторіальні координати RA, DE, фокусна відстань, ширина та висота піксела.
- Перевірка значень рекомендованих для заповнення полів у заголовку кадру.
- Перевірка відповідності ширини та висоти усіх кадрів з базовим кадром.

- Перевірка відповідності RA/DE центрів усіх кадрів з базовим кадром (за наявності відповідних даних) .
- Перевірка відповідності полів зору телескопа всіх кадрів з базовим кадром (за наявності відповідних даних) .
- Перевірка мінімальної кількості кадрів у серії.
- Перевірка вільного місця в папці серії ($4 * N_{frames} * Size_{frame}$)

В таблиці 5.1 подано список ідентифікаторів, які підтримуються, у заголовку кадру та їх відповідність до поля для перевірки.

Обов'язкові поля позначені *, а рекомендовані – **.

Таблиця 5.1. Список ідентифікаторів, які підтримуються у заголовку кадру

Назва	**Ідентифікатор**
NAXIS *	NAXIS
Розрядність *	BITPIX
Ширина кадру *	NAXIS1; WIDTH
Висота кадру *	NAXIS2; HEIGHT
Експозиція *	EXPOSURE; EXP-TIME; EXPTIME; EXP
Дата спостереження *	DATE-OBS; DATE; TIME-OBS
Час спостереження *	DATE-OBS; TIME-OBS; TIME
Телескоп *	TELESCOP
Фільтр *	FILTER; FILTR; CLRBAND
RA **	CRVAL1; RA; RA2000; OBJRA; OBJCTRA; SSA-RA; SSA_RA; RA-TEL
DE **	CRVAL2; DE; DEC; DEC2000; OBJDEC; OBJCTDEC; SSA-DEC; SSA_DEC; DEC-TEL
Фокусна відстань **	FOCALLEN; FOC-LEN; FOC_LEN; FLENGTH; TELFOCUS; FOCUS
Ширина пікселя **	PIXWIDTH; XPIXSZ; XPIXSIZ; XPIXELSZ; PIXSIZE1
Висота пікселя **	PIXHEIGHT; PIXHEIGH; YPIXSZ; YPIXSIZ; YPIXELSZ; PIXSIZE2
BZERO	BZERO
BSCALE	BSCALE
Температура	SET-TEMP; CCD-TEMP; TEMPERAT; TEMP(C); TEMP
WCS	CRPIX1; CRPIX2; CD1_1; CD1_2; CD2_1; CD2_2

Таблиця 5.2. Список ідентифікаторів, які підтримуються у заголовку кадру (продовження)

Назва	Ідентифікатор
Тип кадру	IMAGETYP; IMGETYPE; IMGTYPE
Спостерігач	OBSERVER; OBSERV; OBS
Інструмент	INSTRUME; INSTRUM; INSTR ; CAMERA
Апертура	APERTURE; APTDIA; APER
Широта обсерваторії	LATITUDE; LAT-OBS; SITELAT; LAT
Довгота обсерваторії	LONGOBS; LONG-OBS; LONG; SITELONG; LONGNUM
Висота обсерваторії	ALTOBS; ALT-OBS; ALT

Поданий в таблиці 5.1 список ідентифікаторів, які підтримуються у заголовку кадру, можливо редагувати. Можна замінювати або додавати ідентифікатори, які використовуються, відповідно до індивідуальних налаштувань заповнення заголовків кадрів при їх збереженні. Всі ідентифікатори, які підтримуються, зберігаються у текстовому файлі: «...*CoLiTec****HeaderKeys.xml**». В таблиці 5.2 показано список форматів часу і дати спостереження, які підтримуються. Також підтримуються формати дати та часу, які використовують комбінації форматів таблиці 5.2 з різними розділювачами " ", "**:**", "**T**". Наприклад, "*dd.MM.yyyy HH:mm:ss.SSS*", "*yyyy/MM/dd**:**HH:mm:ss.SSS*", "*yyyy-MM-dd**T**HH:mm:ss.SSS*".

Таблиця 5.3. Список підтримуваних форматів часу та дати спостереження

Назва	Формат
Час спостереження	HH:mm:ss HH:mm:ss.S HH:mm:ss.SS HH:mm:ss.SSS
Дата спостереження	dd.MM.yyyy dd/MM/yyyy dd-MM-yyyy yyyy.MM.dd yyyy/MM/dd yyyy-MM-dd

Серверна частина

Функціональна схема серверної частини ПМЗ CoLiTec служби обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів і даних їх обробки показана на Рис. 5.3.

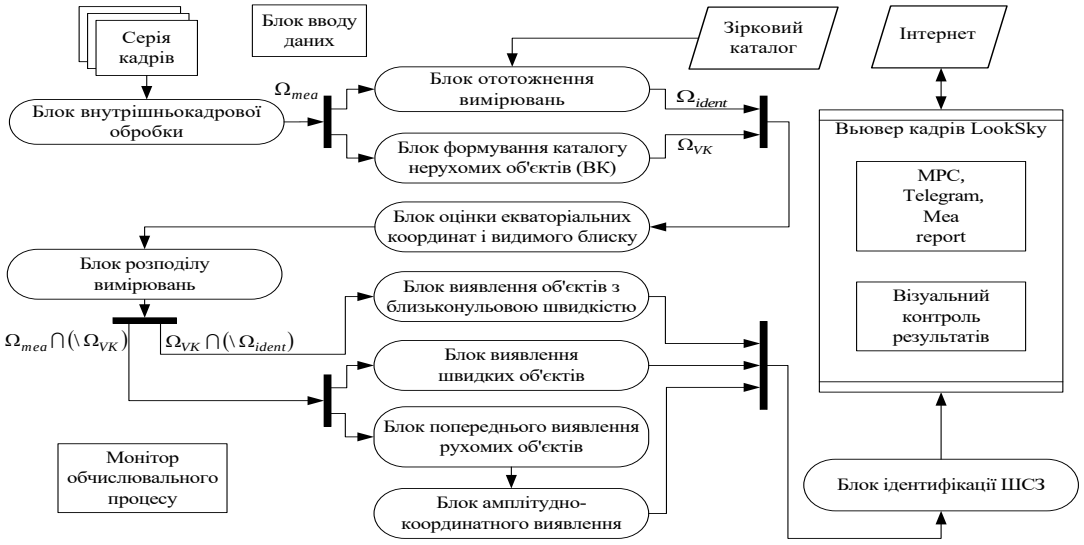


Рис. 5.3. Функціональна схема серверної частини

Конвеєр обробки є послідовністю дій (Рис. 5.4.):

1. Вибір нової серії.
2. Вибір типу обробки.
3. Вибір списку модулів обробки для обраного типу обробки.
4. Підготовка вхідних даних.
5. Контроль вхідних даних.
6. Початок виконання послідовності за обраним списком модулів обробки.
7. Контроль модулів під час обробки.
8. Контроль вихідних даних.
9. Підготовка вихідних даних (даних обробки) .
10. Повний лог та вихідна інформація для користувача.

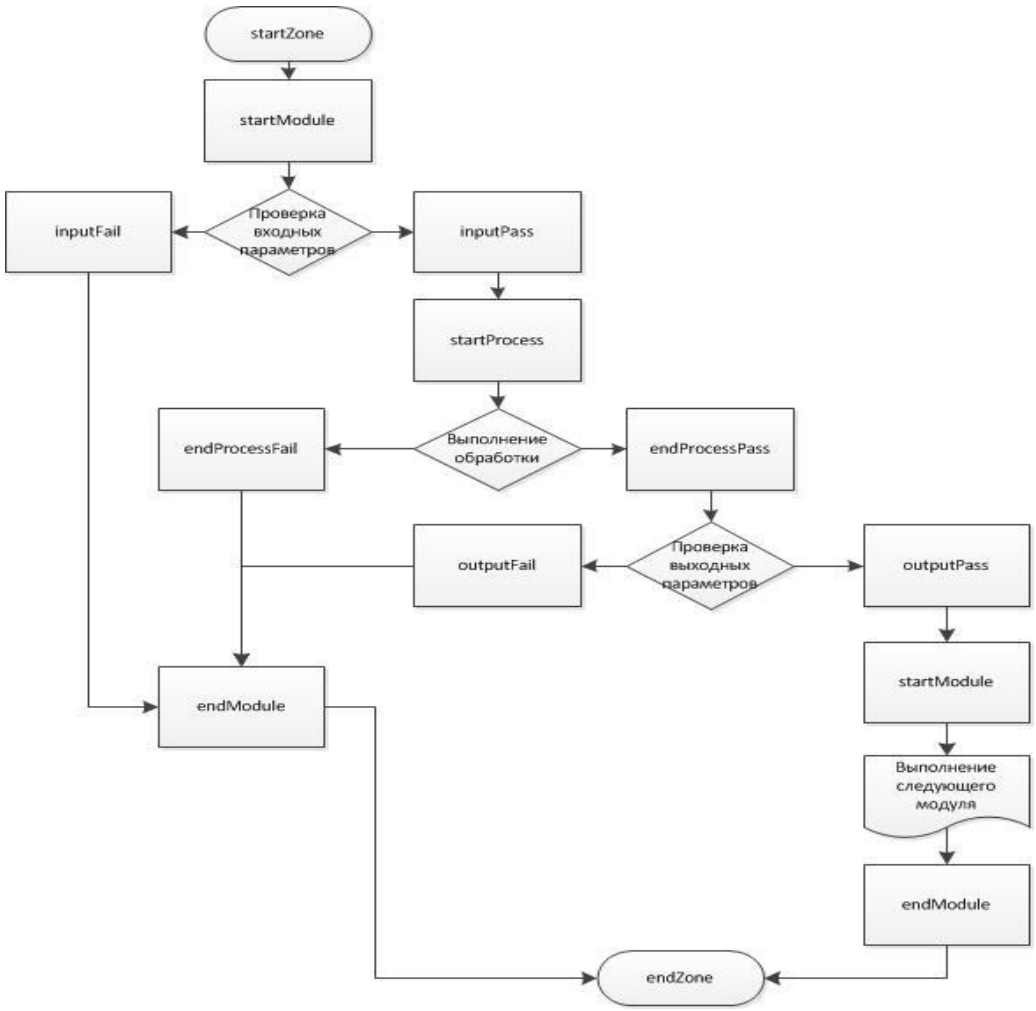


Рис. 5.4. Конвеєр обробки

Кожен етап в конвеєрі обробки (Рис. 5.4.) має своє зарезервоване ключове слово, опис якого представлений в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Опис ключових слів етапів у конвеєрі обробки

Код	Ключове слово	Опис
1	startModule	запуск модуля
2	inputPass	перевірка вхідних даних PASS
3	inputFail	перевірка вхідних даних FAIL
4	startProcess	запуск обробки

5	endProcessPass	закінчення обробки PASS
6	endProcessFail	закінчення обробки FAIL
7	outputPass	перевірка вихідних даних PASS
8	outputFail	перевірка вихідних даних FAIL
9	endModule	модуль завершив свою роботу (результат не важливий)
10	startZone	запуск обробки зони
11	endZone	закінчення обробки зони
12	nope	звичайне повідомлення, на яке не треба звертати увагу
13	terminated	процес не завершився у встановлений час і був знятий

Схема взаємозв'язків таблиць у базі даних сервера з вказівкою первинних і вторинних ключів представлена на Рис. 5.5.

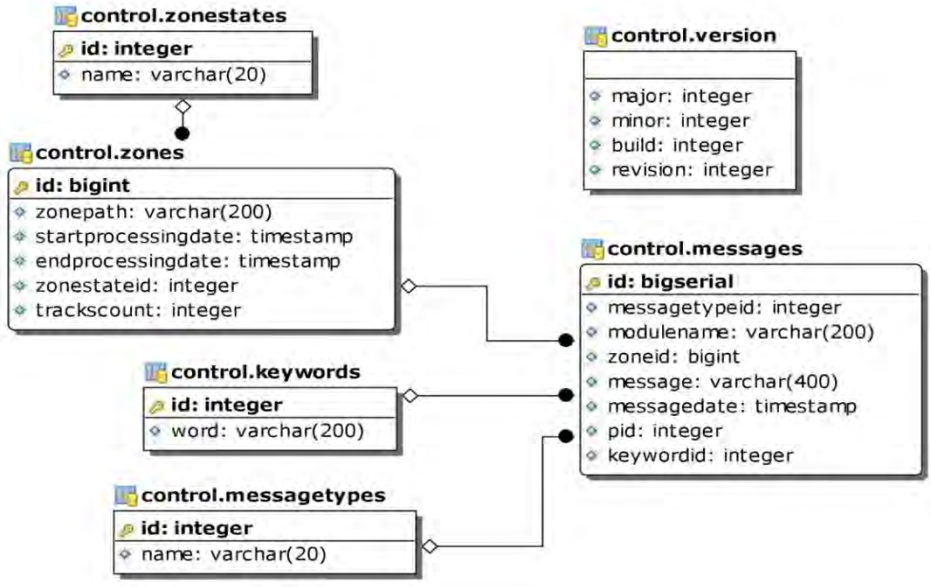


Рис. 5.5. Схема взаємозв'язків таблиць у базі даних сервера

6 АЛГОРИТМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМИ ОБРОБКИ КАДРІВ АСТЕРОЇДНИХ ОГЛЯДІВ

6.1 Порівняльний аналіз програмних пакетів, які реалізовують алгоритми обчислення показників якості функціонування програми обробки кадрів астероїдних оглядів

Для аналізу статистичних характеристик вимірювань (оцінок положення і блиску небесних об'єктів) світова наукова спільнота використовує такі науково-дослідні програмні інструменти як ЕПОС [27, 42, 80], AstDyS [43, 61, 105], Fitsblink [50], а також МРС статистичні властивості нев’язок вимірювань [99,100] в різних обсерваторіях. МРС надає статистичні характеристики нев'язок вимірювань нумерованих і ненумерованих [99] астероїдів і комет по обсерваторіях. Сервіс МРС надає наступні дані: кількість вимірювань за один рік («Tot»), розподіл вимірювань по діапазонах нев'язок («<1"», «<2"», «<3"», «<4"», «>=4"»), середні значення нев'язок за прямим сходженням («R.A») і схиленню («Decl.»), а також оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ) оцінок положення об’єктів у другій екваторіальній СК [18,81] (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 – Приклад статистичних характеристик нев’язок вимірювань ССО за оцінкою сервісу МРС

COD	Year	Tot	<1"	<2"	<3"	<4"	>=4"	R.A.	Decl.
H15	2014	96375	77887	15499	2729	260	0	+0.08 +/- 0.64	+0.00 +/- 0.53

Ці оцінки статистичних характеристик вимірювань містяться в двох текстових таблицях-файлах (оцінки статистичних характеристик за вимірюваннями нумерованих [100] і ненумерованих астероїдів [99]) по усіх обсерваторіях світу. Статистичні властивості вимірювань для кожної

обсерваторії оцінюються і подаються в таблицях-файлах незалежно для кожного року.

ЕПОС (Ефемеридна Програма для Об’єктів Сонячної системи) розроблена в Головній (Пулковській) астрономічній обсерваторії Російської академії наук і є програмним інструментом для астрометричних досліджень об'єктів Сонячної Системи. ЕПОС дозволяє порівняти виміряні координати об'єктів з каталожними (прогнозованими), на момент прив'язки вимірювання. Причому, прогнозування положення об'єктів, програма робить самостійно на основі БД елементів орбіти астероїдів, наприклад, БД MPCorb [107]. У якості БД елементів орбіт об'єктів можуть використовуватися дані обсерваторії Ловела (The Asteroid Orbital Elements Database) [104] та елементи орбіт об’єктів, які надаються Лабораторією реактивного руху (Small-Body Orbital Elements) (Рис. 6.1.).

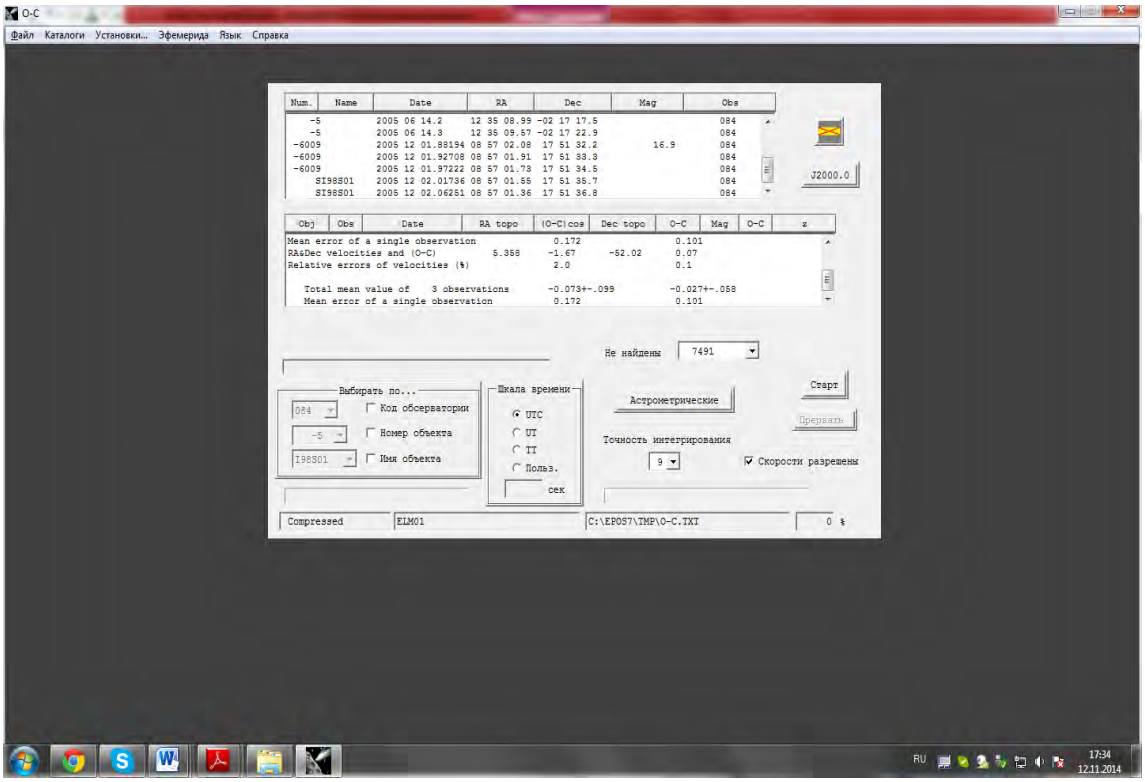


Рис. 6.1. Приклад порівняння виміряних значень параметрів ССО та каталожних за допомогою програмного інструменту ЕПОС

У якості вхідних даних ЕПОС приймає текстовий файл у форматі Циркуляра МРС. Файл містить такі дані про об'єкт, які містяться у вимірюванні: код обсерваторії, номер об'єкта, координати небесного об'єкта в топоцентричній СК [18, 81], а також значення блиску об'єкта, дати і часу вимірювання. ЕПОС робить вибірку вимірювань за ознаками: код обсерваторії, номер або ім'я об'єкта.

На основі каталожних (прогнозованих) положень об'єктів обчислюються значення нев'язок відповідних вимірюванням за прямим сходженням, схиленням і блиском об'єктів. Для сукупності нев'язок, які досліджуються, обчислюються такі статистичні характеристики вимірювань як: середня нев'язка одного вимірювання, значення відносної нев'язки за швидкістю (швидкість об'єкта визначається виходячи з усіх вимірювань серії) швидкістю видимого руху об'єкта на момент "середнього вимірювання", загальна нев'язка за всіма вимірюваннями, середнє зміщення і середньоквадратичне відхилення нев'язок в екваторіальних координатах

AstDyS – науково-дослідний програмний інструмент, який розроблено у Пізанському університеті, видає ці динаміки астероїдів. Вони містять параметри нумерованих і ненумерованих астероїдів, а також оцінку точності вимірювань обсерваторії [43]. На сайті AstDyS представлені такі статистичні характеристики вимірювань по кожній обсерваторії щорічно: рік статистичного аналізу вимірювань, кількість вимірювань за рік аналізу, кількість відбракованих вимірювань (за різними критеріями), відсоток відбракування вимірювань, оцінку середньоквадратичного відхилення (СКВ) невідбракованих вимірювань та оцінку СКВ усіх вимірювань (Рис. 6.2.).

AstDyS використовує свою базу даних об'єктів, яка оновлюються за допомогою сервісів МРС [86]. Орбіти об'єктів обчислюються за допомогою ПЗ OrbFit [103].

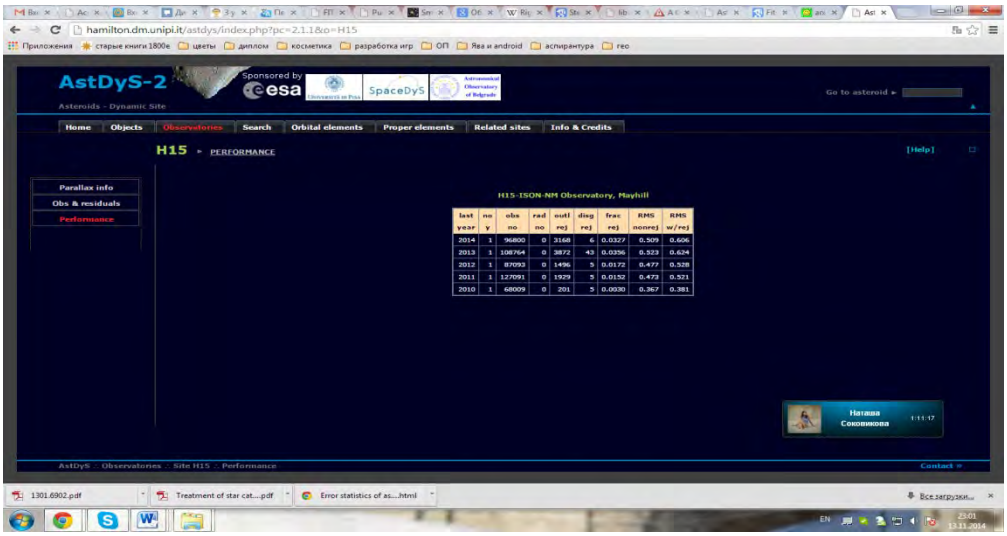


Рис. 6.2. Приклад дослідження роботи обсерваторії за допомогою сервісу AstDyS

Таблиця 6.2 – Приклад надання інформації про статистичні характеристики невʼязок вимірювань сервісом AstDyS

Object	Obser	Date		Right Ascension					
Design	K T N	YYYY MM DD.dddddddddd	Accuracy	HH MM SS.sss	Accuracy	RMS	F	Bias	Resid
311890	O C	2013 03 13.31957	1.000E-05	11 41 03.090	1.500E-01	0.660	F	0.000	-0.383

Declination						Magnitude			
sDD MM SS.ss	Accuracy	RMS	F	Bias	Resid	Val	B	RMS	Resid
-11 49 46.40	1.000E-01	0.590	F	0.000	-0.758	19.2	R	0.70	-0.09

Ast	Obs	Residual	SEL
Cat	Cod	Chi	A M

q	H15	1.44	1 1

Інформацію про усі вимірювання кожної обсерваторії сервіс надає у вигляді текстового файлу по кожній обсерваторії. Інформація береться з архіву MPC [87]. Файл містить таку інформацію: номер об'єкта («Object»), дату і час вимірювання («Date»), значення прямого сходження і схилення, критерій хі-квадрат нев'язки до нормального закону, середньоквадратичне відхилення екваторіальних координат і блиску ("RMS"), оцінку середнього зміщення ("Bias") і значення нев'язки ("Resid") екваторіальних координат об'єктів («Right Ascension» і «Declination»), а також блиску («Magnitude») (таблиця 6.2).

Fitsblink – програмний інструмент для аналізу астрономічних зображень, який містить у собі модуль для розрахунку статистичних характеристик астероїдів. Параметри об'єктів беруться з сервісу MPCOrb, а їх ефемериди обчислюються за допомогою ПЗ OrbFit. Нев'язки обчислюються як різниця між виміряними значеннями (які завантажуються з текстового файлу у форматі Циркуляра MPC) і каталожними значеннями розрахованими за допомогою MPCOrb. У якості вихідних даних сервіс надає розподіл значень нев'язок положень об'єктів по діапазонах, середнє значення нев'язок за прямим сходженням і схиленням, а також оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ) оцінок положення об'єктів у екваторіальній СК (таблиці 6.3, 6.4).

Таблиця 6.3 – Приклад розподілу нев́язок положення об’єктів по діапазонах, який надається Fitsblink

Residual	No. of observations	Percentage
< 0.2:	0	0.0 %
< 0.5:	1	20.0 %
< 1.0:	3	60.0 %
< 2.0:	5	100.0 %
> 2.0:	0	0.0 %
> 10.00:	0	0.0 %
All asteroids	5	

Таблиця 6.4 – Приклад надання статистичних характеристик нев́язок вимірювань програмним інструментом Fitsblink

Average total residual (<10.00)	0.83 +- 0.40 arcsec
Average RA residual (<10.00)	-0.51 +- 0.10 arcsec
Average DEC residual (<10.00)	-0.41 +- 0.64 arcsec

Сервіс надає також графік розподілу нев'язок екваторіальних координат, гістограму розподілу нев'язок та графік розподілу значень блиску відносно нев'язок екваторіальних координат (рисунок 6.3, 6.4). Fitsblink може імпортувати списки зір і ототожнювати їх з каталогами з GSC, USNO A и SA.

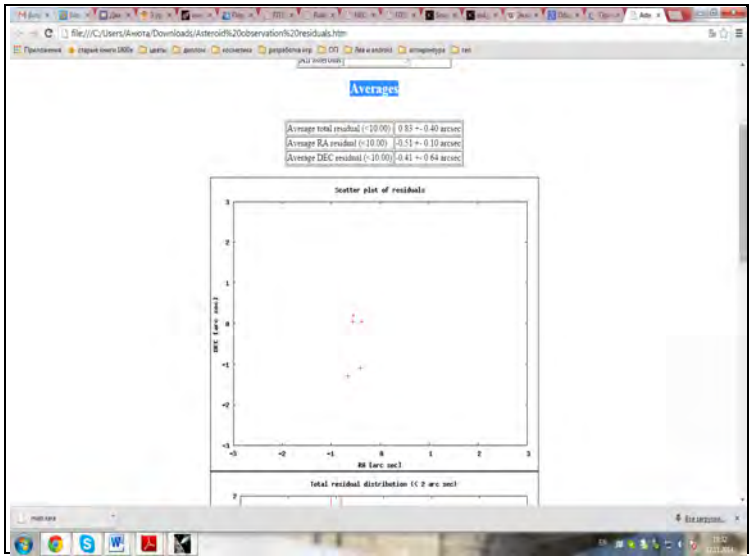


Рис. 6.3. Приклад розподілу нев'язок екваторіальних координат, який надається програмним інструментом Fitsblink

Усі перераховані науково-дослідні інструменти надають статистичні характеристики (оцінку середньоквадратичного відхилення і математичне очікування нев'язок) об'єктів тільки по екваторіальних координатах в текстовому вигляді. Сервіс Fitsblink дозволяє наочно побачити аналіз статистичних властивостей за допомогою графіків і гістограм. Після чого

інформацію необхідно обробляти сторонніми статистичними пакетами, що знижує оперативність надання результатів програм і підвищує витрати для аналізу статистичних характеристик вимірювань положення і блиску небесних об’єктів.

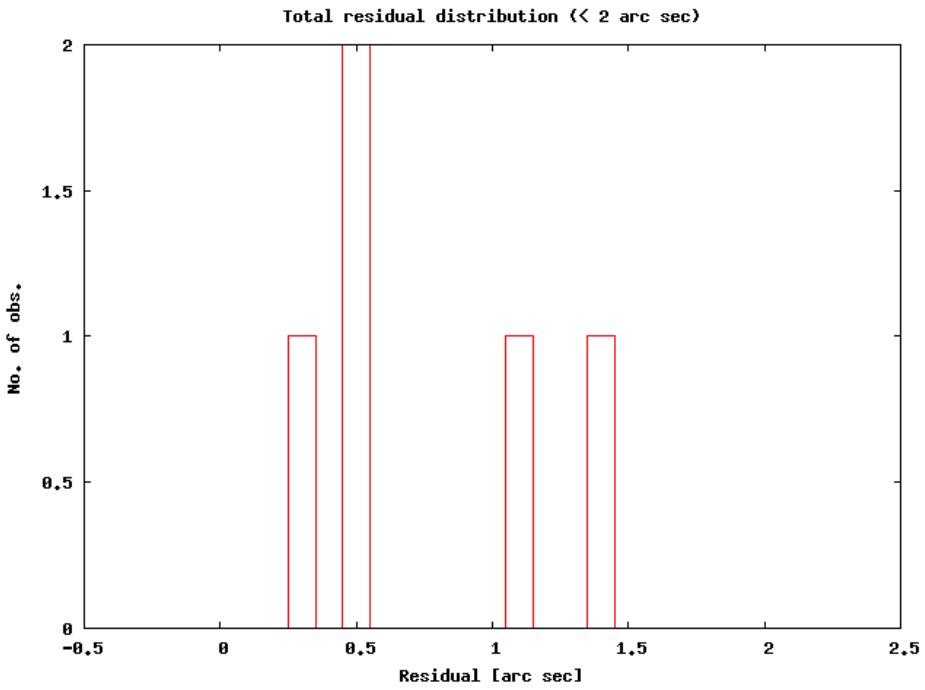


Рис. 6.4. Приклад гістограми розподілу нев’язок положення об’єктів

Дослідницький інструмент ЕПОС зберігає значення основних елементів орбіт об'єктів на комп'ютері користувача. З часом це може давати неправильні результати обчислень, оскільки параметри орбіт об'єктів не коригуються.

Описані дослідницькі програмні інструменти не мають можливості аналізувати залежності нев'язок оцінок екваторіальних координат від координат об'єктів в СК ПЗЗ-кадра. Таким чином, не можна визначити систематичні помилки в оцінках координат і значеннях блиску об'єктів від положення зображення об'єктів на кадрі. Так само ЕПОС і Fitsblink приймають як вхідні дані файл, у форматі циркуляра MPC, який містить тільки екваторіальні координати і значення блиску об'єктів. Такі вхідні дані

не дозволяють проводити аналіз за іншими параметрами об'єктів, наприклад, положення на кадрі.

6.2 Алгоритм дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, які зберігається в архіві МРС або містяться у вимірюваннях, які відповідають досліджуваним кадрам

Дослідження статистичних властивостей оцінок положення і блиску ССО. Рапорт МРС містить оцінки положення об'єктів в екваторіальних координатах. У зв'язку з цим статистичні властивості оцінок, які отримуються, також досліджувалися в екваторіальній системі координат.

Статистичні властивості оцінок положення і блиску космічних об'єктів досліджувалися для вимірювань на кадрах, ототожнених з:

– опорними зорями;

– зорями із астрометричного (для оцінок положення) і фотометричного (для оцінок блиску) каталогів;

– астероїдами, за якими сформовані вимірювання при обробці заданої сукупності серій кадрів.

Крім того, досліджувались статистичні властивості вимірювань із архіву МРС.

Досліджувалися такі статистичні характеристики як оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ) σ_α, σ_δ, σ_m та середнє зміщення оцінок екваторіальних координат між каталожними і розрахунковими значеннями $\bar{\Delta}_\alpha$, $\bar{\Delta}_\delta$, і $\bar{\Delta}_m$. Також визначались оцінки коефіцієнтів асиметрії і ексцесу екваторіальних координат об’єктів.

Нев'язки між вимірюваннями і каталожними значеннями оцінок екваторіальних координат (прямого сходження і схилення) і блиску об'єктів обчислюються згідно з виразами:

$$\Delta_{\alpha i} = \alpha_{j_1(i)} - \alpha; \tag{6.1}$$

$$\Delta_{\delta i} = \delta_{j_1(i)} - \delta; \tag{6.2}$$

$$\Delta_{\mathrm{mi}} = m_{j_1(i)} - m, \tag{6.3}$$

де i – номер пари вимірювання кадру-формуляр каталога, що розглядається; $\alpha_{j_1(i)}$, $\alpha_{j_2(i)}$, $\delta_{j_1(i)}$,$\delta_{j_2(i)}$– пряме сходження і схилення j_1-го вимірювання кадру і j-го формуляра каталогу, що складають в i-у ототожнену пару;

$m_{j_1(i)}$, m $m_{j_{№}(i)}$– оцінка значення блиску j_1-го вимірювання кадру і j-го формуляра каталогу , що входять в i-у ототожнену пару;

j_1 – номер вимірювання, сформованого на кадрі, що досліджується, у внутрішній нумерації вимірювань кадру;

j – номер формуляра каталогу, який використовується, у внутрішній нумерації формулярів каталогу.

Нев'язки між вимірюваннями і каталожними значеннями оцінок X і Y координат об’єктів в системі координат ПЗЗ-кадра (прямокутна система координат ПЗЗ-кадра з центром в лівому верхньому куті ПЗЗ-кадра) обчислюються згідно з формулами:

$$\Delta_{\mathrm{Xi}} = X_{j_1(i)} - X; \tag{6.4}$$

$$\Delta_{\mathrm{Yi}} = Y_{j_1(i)} - Y, \tag{6.5}$$

де $X_{j_1(i)}$, $X_{j_2(i)}$, $Y_{j_1(i)}$, $Y_{j_2(i)}$– координати X і Y j_1-го вимірювання кадру і j-го формуляра каталога, які складають в i-у ототожнену пару.

Оцінка середнього зміщення (математичного очікування нев'язок) оцінок екваторіальних координат і блиску об'єктів визначалися згідно виразів [7]:

$$\bar{\hat{\Delta}}_{\alpha} = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{meas}}} \Delta_{\mathrm{ai}} / N_{\mathrm{meas}}; \tag{6.6}$$

$$\bar{\hat{\Delta}}_{\delta} = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{meas}}} \Delta_{\delta i} / N_{\mathrm{meas}}; \tag{6.7}$$

$$\bar{\hat{\Delta}}_{m} = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{meas}}} \Delta_{\mathrm{mi}} / N_{\mathrm{meas}}, \tag{6.8}$$

де N_{meas} – кількість вимірювань, що використовуються для аналізу точності оцінок положення об'єктів.

Оцінка середнього зміщення (математичного очікування нев'язок) оцінок положення об'єкту за координатами X і Y об’єктів визначалось за наступними формулами[7]:

$$\bar{\hat{\Delta}}_X = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{\text{Xi}} / N_{\text{meas}}; \tag{6.9}$$

$$\bar{\hat{\Delta}}_Y = \sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \Delta_{\text{Yi}} / N_{\text{meas}}. \tag{6.10}$$

Оцінка середньоквадратичного відхилення нев'язок оцінок координат за прямим сходженням і схиленням, а також блиску об'єктів обчислювалося таким чином [7]:

$$\hat{\sigma}_\alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\alpha i} - \bar{\hat{\Delta}}_\alpha\right)^2 (N_{\text{meas}} - 1)}; \tag{6.11}$$

$$\hat{\sigma}_\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\delta i} - \bar{\hat{\Delta}}_\delta\right)^2 (N_{\text{meas}} - 1)}; \tag{6.12}$$

$$\hat{\sigma}_m = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\text{mi}} - \bar{\hat{\Delta}}_m\right)^2 (N_{\text{meas}} - 1)}. \tag{6.13}$$

Оцінка середньоквадратичного відхилення нев’язок оцінок координат X і Y об’єктів обчислювалася аналогічно [7]:

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\text{Xi}} - \bar{\hat{\Delta}}_X\right)^2 (N_{\text{meas}} - 1)}; \tag{6.14}$$

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\text{Yi}} - \bar{\hat{\Delta}}_Y\right)^2 (N_{\text{meas}} - 1)}. \tag{6.15}$$

При дослідженні статистичних властивостей оцінок місця розташування об'єктів розраховувалися оцінки коефіцієнтів асиметрії $\hat{\gamma}_1$ екваторіальних координат об’єктів [8]:

$$\hat{\gamma}_{\alpha 1} = \frac{\sqrt{N_{\text{meas}}(N_{\text{meas}}-1)}}{N_{\text{meas}}-2} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\alpha i} - \bar{\hat{\Delta}}_\alpha\right)^3}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}} \left(\Delta_{\alpha i} - \bar{\hat{\Delta}}_\alpha\right)^2\right)^{3/2}}; \tag{6.16}$$

$$\hat{\gamma}_{\delta 1} = \frac{\sqrt{N_{\text{meas}}(N_{\text{meas}}-1)}}{N_{\text{meas}}-2} \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\delta i}-\bar{\Delta}_{\delta})^3}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\delta i}-\bar{\Delta}_{\delta})^2\right)^{3/2}}. \quad (6.17)$$

Вирази для оцінок коефіцієнтів ексцесу $\hat{\gamma}_2$ [17] за прямим сходженням і схиленням оцінок координат об'єктів мають вигляд:

$$\hat{\gamma}_{\alpha 2} = \frac{N_{\text{meas}}{}^2-1}{(N_{\text{meas}}-2)(N_{\text{meas}}-3)}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\alpha i}-\bar{\Delta}_{\alpha})^4}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\alpha i}-\bar{\Delta}_{\alpha})^2\right)^2}-3+\frac{6}{N_{\text{meas}}+1}\right); \quad (6.18)$$

$$\hat{\gamma}_{\delta 2} = \frac{N_{\text{meas}}{}^2-1}{(N_{\text{meas}}-2)(N_{\text{meas}}-3)}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\delta i}-\bar{\Delta}_{\delta})^4}{\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{meas}}}(\Delta_{\delta i}-\bar{\Delta}_{\delta})^2\right)^2}-3+\frac{6}{N_{\text{meas}}+1}\right). \quad (6.19)$$

Середньоквадратичне відхилення оцінки коефіцієнтів асиметрії і ексцесу оцінок екваторіальних координат об'єктів обчислювалися згідно з виразами [17]:

$$\sigma_{\gamma_1} = \sqrt{\frac{6(N_{\text{meas}}-2)}{(N_{\text{meas}}+1)(N_{\text{meas}}+3)}}; \quad (6.20)$$

$$\sigma_{\gamma_2} = \sqrt{\frac{24N_{\text{meas}}(N_{\text{meas}}-2)(N_{\text{meas}}-3)}{(N_{\text{meas}}+1)^2(N_{\text{meas}}+3)(N_{\text{meas}}+5)}}. \quad (6.21)$$

У роботі також досліджувалися властивості оцінок екваторіальних координат (прямого сходження і схилення як системи випадкових величин [7, 76]. Дослідженню підлягали: головні дисперсії, оцінки коваріації та коефіцієнта кореляції нев'язок оцінок екваторіальних координат об'єктів, а також кут між головною віссю еліпса розсіювання і віссю абсцис.

Оцінку коваріації нев'язок оцінок екваторіальних координат об'єкту можна обчислити таким чином [7]:

$$\hat{K}_{\alpha\delta} = \left[\sum_{i=1}^{N}(\Delta_{\text{ai}}\Delta_{\delta i})/N_{\text{meas}} - \bar{\Delta}_{\alpha}\bar{\Delta}_{\delta}\right]\frac{N_{\text{meas}}}{N_{\text{meas}}-1}. \quad (6.22)$$

Оцінка коефіцієнта кореляції нев'язок оцінок екваторіальних координат об'єкту визначалася таким чином [7]:

$$\hat{r}_{\alpha\delta} = \hat{K}_{\alpha\delta}/\sqrt{\hat{\sigma}_{\alpha}\hat{\sigma}_{\delta}} \quad (6.23)$$

Кут між головною віссю еліпса розсіювання і віссю абсцис екваторіальної СК, визначається виразом: [7]:

$$\mathrm{tg}2\hat{\psi} = 2\hat{r}_{\alpha\delta}\hat{\sigma}\hat{\sigma}_{\delta}/\left(\hat{\sigma}_{\alpha}^{2} - \hat{\sigma}_{\delta}^{2}\right). \quad (6.24)$$

Головні дисперсії нев'язок оцінок координат за прямим сходженням і схиленням об'єкту [7] визначалися у такий спосіб:

$$\left(\hat{D}'_{\alpha}\right)^{2} = \hat{\sigma}_{\alpha}^{2}\cos^{2}\hat{\psi} + \hat{r}_{\alpha\delta}\hat{\sigma}_{\alpha}\hat{\sigma}_{\delta}\sin 2\hat{\psi} + \hat{\sigma}_{\delta}^{2}\sin^{2}\hat{\psi}\Big| \quad \Big\}. \quad (6.25)$$

Використання в якості еталонних даних сторонніх сервісів. В якості еталонних значень положень зірок, використовувалися дані з астрометричного каталогу UCAC 4.0 [108]. Його середня щільність складає більше 2000 зір на квадратний градус. Каталог містить дані про більш ніж 113 мільйонів зір, і покриває небо за блиском до 16^{m} зор. вел. Помилка положення будь-якого об'єкту складає не більше 20 кутових мілісекунд. Помилка власного руху об'єкту складає від 2 до 8 кутових мілісекунд / рік.

В якості еталонних значень блиску об'єкту використовувалися дані фотометричного каталогу USNO B1.0. Каталог містить оцінки положень і блиску більше одного мільярда об'єктів, які були зібрані за 3,6 мільярди окремих вимірювань. В якості еталонних значень координат об'єктів сонячної системи (ССО) використовувалися прогнозовані значення ефемерид, що надаються службами астрономічних центрів. Ефемериди являють собою таблиці видимих положень об'єктів сонячної системи на небесній сфері. Найбільш популярними джерелами координат ССО є Minor Planet Center (MPC, Jet Propulsion Laboratory (JPL) і Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides (IMCCE) [102].

З еталонними значеннями координат ССО порівнюються координати положення нумерованих астероїдів, отримані за допомогою ПЗ CoLiTec (файл траєкторій Exit_CLT.kam) або із архіву MPC. Архів MPC є текстовим файлом, що містить дані про ССО від усіх обсерваторій за весь час спостереження. MPC надає архіви по нумерованих і ненумерованих астероїдах, кометах і нерегулярних супутниках. Архів нумерованих астероїдів містить такі дані: MPC- код обсерваторії, номер астероїда, дату і час вимірювання, екваторіальні координати, а також оцінку блиску астероїда.

Для дослідження необхідних об'єктів, необхідно прочитати тестовий файл і вибрати дані по обсерваторії, що цікавить. Використання різних еталонних і виміряних джерел значень параметрів об'єктів показано на рисунку 6.5.

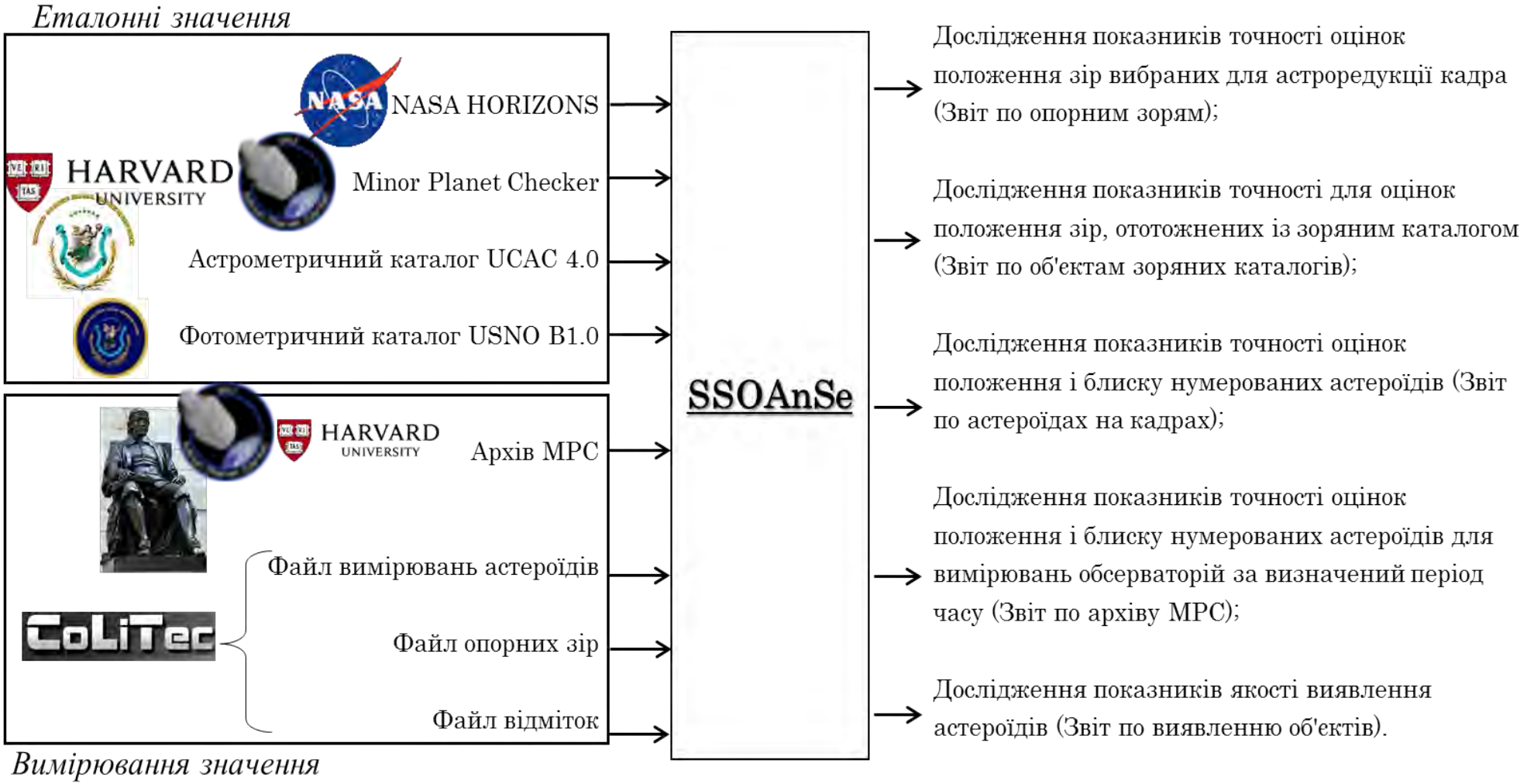


Рис.6.5 – Використання різних джерел в еталонних і виміряних значень параметрів обєктів

Для аналізу траєкторій в якості вхідних параметрів об'єктів беруться значення із файлу траєкторій (Exit _ CLT.kam) : час (time[час]), координати об'єкта (RA[гр.], DE[гр.]), значення блиску об'єкта (m[зв]). Цей файл створюється ПЗ CoLiTec. З файлу траєкторій відбираються нумеровані астероїди, і формується запит до сервісу NASA HORIZONS [71]. Нумеровані астероїди мають код, який повертається службою MPCChecker, за п'ятьма позиціями (наприклад Y7381), а ненумерований має довжину 7 (Наприклад BE26B12).

Для визначення статистичних властивостей оцінок положення ССО доцільно використати тільки оцінки положення нумерованих астероїдів. Параметри їх орбіт відомі досить точно. Помилки в прогнозі положення нумерованих астероїдів на момент формування вимірювань більш ніж на порядок перевищують помилки вимірювань. Отже, помилки каталогу для нумерованих астероїдів не вплинуть значимо на якість дослідження властивостей оцінок положення ССО. Цього не можна сказати про використання даних для ненумерованих астероїдів, у зв'язку з чим останні не використовуються. Лабораторія Реактивного Руху (Jet Propulsion Laboratory, JPL) – науково-дослідний центр НАСА, який підтримує сервіс NASA HORIZONS, який містить ефемериди ССО [71]. Головною перевагою системи HORIZONS є можливість отримання ефемерид нумерованих астероїдів через e - mail [71]. Цей тип доступу дозволяє в одному запиті відправити інформацію для близько 200 об'єктів. Кількість листів, які отримують на запит, залежить від числа ССО, на які подано запит. Кожна відповідь містить дані про ефемериди для необхідного ССО [71]. Аналіз способів отримання даних від NASA HORIZONS представлений в табл. 6.5.

Поштовий спосіб доступу до NASA HORIZONS дозволяє зібрати декілька запитів в один пакет, що дає можливість за одну одиницю часу отримувати більше ніж одну відповідь. На відміну від Telnet, поштовий метод не створює навантаження на сервери NASA HORIZONS, обробляючи запити поступово, а також не вимагає постійного з'єднання.

Таблиця 6.5 – Аналіз способів доступу до системи NASA HORIZONS.

Способи доступа до NASA HORIZONS	Web-интерфейс	E-mail	Telnet
Кількість об’єктів, які отримують за одиницю часу	1	До 200	1
Обробка запитів	Миттєва	Поступова	Миттєва
Постійне з’єднання	Ні	Ні	Так

Доступ за допомогою e - mail не вимагає додаткових витрат на запити або побудову графічного інтерфейсу. Лист із запитом відправляється на поштову адресу horizons@ssd.jpl.nasa.gov [71].

Таблиця 6.6 показує порівняння методів доступу і точності координат об’єктів різних сервісів.

Таблиця 6.6 – Порівняльна таблиця точності значень координат об’єкта і методів доступу до сервісів.

Служба	IMCCE	NASA HORIZONS	MPC
Доступ за допомогою web-інтерфейсу	Так	Так	Так
Доступ за допомогою telnet	Ні	Так	Ні
Доступ за допомогою e-mail	Ні	Так	Ні
Доступ за допомогою скриптів	Ні	Так	Так
Точність значень координат об’єктів в секундах (кіл. зн. після коми)	3	4	1

Сервіси IMCCE і NASA HORIZONS надають дані з найбільшою точністю. В усіх трьох службах недоліком web-інтерфейсу є отримання за одиницю часу даних тільки про один об'єкт (таблиця 6.6). Виходячи з вище вказаних відомостей і в результаті проведеного дослідження, для аналізу точності оцінки місця розташування астероїдів використовується порівняння оцінок, сформованих програмою обробки результатів спостережень, із значеннями, наданими сервісом NASA HORIZONS.

Використання підвибірок вимірювань з різними значеннями параметрів. На різних частинах кадру вимірювання положення об'єктів можуть мати різні показники точності. Це може бути викликано помилками астрометрії, неточностями виготовлення оптичної системи або особливостями конкретного кадру (наприклад, можливі віньєтування, засвітки, або затемнення на краях кадра). У таких випадках, для досліджень можна використати підвибірки вимірювань з різними значеннями параметрів.

Включення вимірювань у вибрану дослідником підвибірку може робитися за такими параметрами: відстань центру зображення об'єктів від центру кадру, швидкість видимого руху об'єктів, значення блиску і наявність близьких об'єктів, що відповідає перетину зображень близьких об'єктів.

Для включення вимірювань в досліджувану підвибірку за відстанню центру зображення об'єктів від центру кадру, слід вказати діапазони значень даних відстаней, з яких вибиратимуться вимірювання. Значення відстані 0 відповідає центру кадру. Значення мінімальної і максимальної відстані включення вимірювань в підвибірку, що досліджується на кадрі, вказуються в пікселах. Включаються усі вимірювання на кадрі, які потрапляють у вказаний діапазон.

У разі включення вимірювань в досліджувану підвибірку за значенням швидкості видимого руху об'єктів, вказується діапазон від мінімальної до максимальної швидкості. З усіх вимірювань вибираються ті, які відповідають заданому діапазону. Включення вимірювань в досліджувану підвибірку за значенням видимого блиску об'єктів відбувається аналогічно включенню за швидкістю видимого руху об'єктів.

Близькі об'єкти зазвичай мають істотно гірші оцінки своїх параметрів. Це пов'язано з тим, що зображення об'єктів в компактній групі перетинаються, і, в цьому сенсі, об'єкти вважаються статистично залежними один від одного. Тому часто має сенс розглядати статистичні характеристики нев'язок таких об'єктів окремо.

У підвибірку близьких об'єктів включаються астероїди (відповідні вимірювання), в заданому околі яких розташовані інші об'єкти (астероїди або зорі):

$$\sqrt{\left(X_{\text{obj}} - X_j\right)^2 + \left(Y_{\text{obj}} - Y_j\right)^2} < 3(\sigma_{\text{obj}} + \sigma_j) \tag{6.26}$$

де σ_{obj} – параметр форми зображення астероїда, який аналізується;

σ_j – параметр форми зображення j-го об’єкта, який знаходиться в околі досліджуваного астероїда;

X_{obj}, Y_{obj} – координати астероїда, який аналізується;

X_j, Y_j – координати j-го вимірювання об’єкта в околі астероїда, що аналізується.

Опис початкових даних для дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів. У міжнародних спеціалізованих БД (зокрема, БД МРС і БД, що використовуються сервісом NASA HORIZONS) містяться досить точні оцінки параметрів орбіт нумерованих астероїдів. В зв'язку з цим, для контролю точності оцінки координат і блиску астероїдів обсерваторіями в нашому дослідженні використовуються ефемериди нумерованих астероїдів. У якості еталонних значень положення і блиску астероїдів використовуються дані від сервісу NASA HORIZONS, який надає каталожні ефемериди об'єктів Сонячної системи. У цій частині дослідження оцінками, що розглядаються, виступають оцінки положення і блиску нумерованих астероїдів, що містяться в параметрах вимірювань. Ці вимірювання відповідають сукупності кадрів, що досліджується (при використанні ПЗ CoLiTec вимірювання, які досліджуються, містяться у файлі астероїдів Exit _ CLT.kam).

Для проведення досліджень точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів з архіву МРС в якості виміряних значень використовуються вимірювання, які зберігаються в архіві МРС.

Перерахунок каталожних значень блиску об'єктів. Сервіси NASA HORIZONS, MPC повертають значення блиску відомих ССО у фільтрі V (візуальний блиск). З іншого боку, камери, що зазвичай використовуються в астероїдних оглядах, повертають фотографічний блиск зорі (нефільтрований блиск). При цьому значення оцінок блиску одного об'єкту на основі кадрів, отриманих різними ПЗЗ-камерами, може відрізнятися. Дана відмінність пов'язана з тим, що матриці мають різну світлочутливість і можуть бути оснащені різними фільтрами.

Для перерахунку значень блиску об'єктів, отриманих в результаті спостережень в значення, які надаються сервісом NASA HORIZONS, використовуються вимірювання астероїдів, координати яких знаходяться від центру кадру не далі наперед заданої константи обчислювального методу (складає 0,16 меншої сторони кадру). Ця константа визначається експериментально. Попередні дослідження показали, що для адекватного перерахунку достатнім є використання однієї з двох моделей:

$$m_{\mathrm{NF}_i} = m_{F_i} + a_{0_1}, \tag{6.27}$$

$$m_{\mathrm{NF}_i} = a_1 m_{F_i} + a_{0_2}, \tag{6.28}$$

де m_{NF_i} – значення нефільтрованого блиску i-го вимірювання отриманого від сервісу NASA HORIZONS (еталонне значення блиску об’єкта) згідно з першою і другою моделями перерахунку; m_{F_i} – значення (отримане за запитом від сервісу NASA HORIZONS) блиску i-го об’єкта, в фільтрі V (візуальний блиск); a_{0_1}, a_1, a_{0_2} – коефіцієнти моделі.

Оцінка коефіцієнтів полінома виконується шляхом мінімізації цільової функції:

$$\Phi(a_1, a_{0_2}) = \sum_i^{N_{\mathrm{cnt}}} (m_{\mathrm{cat}_i} - m_{\mathrm{cnt}_i})^2 \overrightarrow{a_1, a_{0_2}} \min \tag{6.29}$$

де m_{cnt_i} – оцінка блиску i-го об’єкта, вибраного із центра кадра;

N_{cnt}– кількість об'єктів, вибраних з центра кадра.

Визначення значень швидкості астероїдів. Процес визначення кутової швидкості об'єкта можна розділити на операцію визначення центрального кута між двома положеннями об'єкта на небесній сфері у близькі моменти часу і операцію визначення різниці часу між проходженням об'єктом цих положень.

Положення i-го об’єкта в будь-який момент часу задається екваторіальними координатами $\alpha_{\text{it}},\ \delta_{\text{it}}$.

Декартові координати $x_{\text{it}},\ y_{\text{it}},\ z_{\text{it}}$ точки (початок системи координат знаходиться в центрі небесної сфери) з екваторіальними координатами $\alpha_{\text{it}}, \delta_{\text{it}}$ на сфері одиничного радіуса визначаються виразом:

$$X_{\text{it}} = (x_{\text{it}}|\quad)(y_{\text{it}}|\quad). \tag{6.30}$$

Кут між положеннями об’єкта X_{i1} і X_{i2}в моменти часу t_1 і t_2, відповідно, визначаються виразом:

$$\cos(X_{i1}, X_{i2}) = \frac{x_{i1}x_{i2}+y_{i1}y_{i2}+z_{i1}z_{i2}}{\sqrt{x_{i1}^2+y_{i1}^2+z_{i1}^2}\sqrt{x_{i2}^2+y_{i2}^2+z_{i2}^2}} \tag{6.31}$$

Оскільки досліджувані точки лежать на сфері одиничного радіуса, то знаменник виразу (30) дорівнює 1 за визначенням. Так само значення шуканого центрального кута (кута з вершиною в центрі небесної сфери) між двома положеннями об'єкту, у близькі моменти часу, визначається виразом:

$$\Delta_{12} = \arccos(x_{i1}x_{i2} + y_{i1}y_{i2} + z_{i1}z_{i2}) \tag{6.32}$$

Визначення різниці часу, між проходженням об'єкту цих положень, труднощів не викликає.

Алгоритм дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, які зберігаються в архіві МРС або містяться у вимірюваннях, які відповідають досліджуваним кадрам. З урахуванням описаних вище особливостей, алгоритм досліджень являє собою наступну послідовністю дій.

1. Для підготовки початкових даних виконуються наступні дії.

1.1. Для виконання дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів на сукупності кадрів, що досліджуються, виконуються дії пунктів 1.1.1.-1.1.2 (рисунок 6.6).

1.1.1. Вибір із сукупності сформованих вимірювань (при використанні ПЗ CoLiTec дані беруться з файлу Exit _ CLT.kam) параметрів ототожнених нумерованих астероїдів. До них відносяться: номер астероїда, дата і час вимірювання, оцінка екваторіальних координат (RA і DE) об'єкту, значення оцінки блиску об'єкта, а також оцінка координат об'єкта в прямокутній СК ПЗЗ-кадра

1.1.2. Створення, згідно інструкції, запитів до сервісу NASA HORIZONS про ефемериди заданих нумерованих астероїдів на вказані моменти часу. Запити містять номери астероїдів, дату і час вимірювань, а також МРС- код обсерваторії. У запитах нумеровані астероїди групуються за часом. Ці групи поміщаються в листи (у одному листі можна відправляти не більше 200 значень). Для визначення швидкості астероїда беруться ефемериди з кроком 10 хвилин (2 значення координат). Запити відсилаються автоматично електронною поштою.

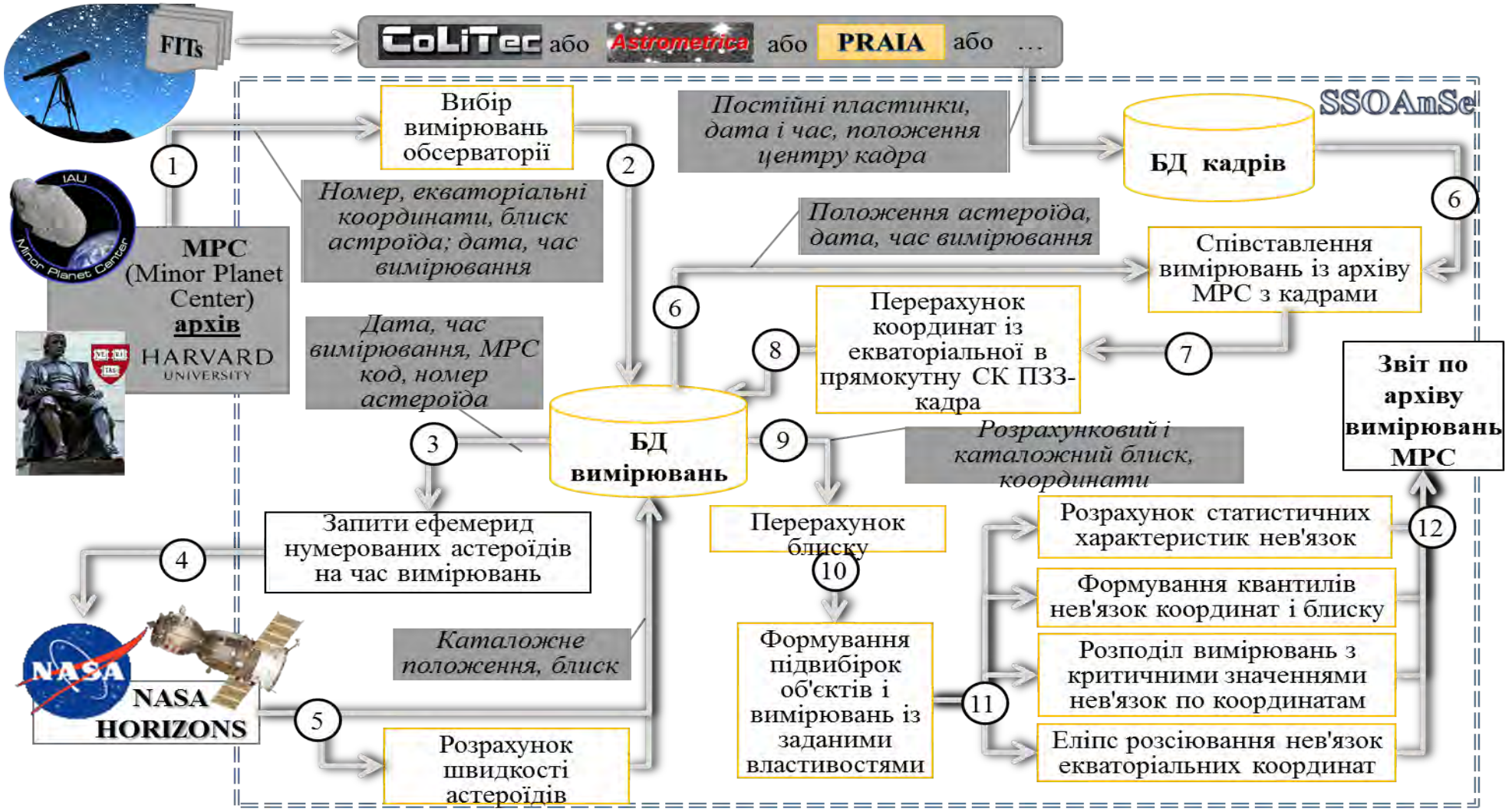


Рисунок 6.6 –Потоки даних при дослідженні точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів на сукупності кадрів, що досліджуються.

1.2. Для проведення дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, що містяться у вимірюваннях заданого тимчасового інтервалу, які зберігаються в архіві MPC, виконуються дії, описані в пунктах 1.2.1.-1.2.5 (рисунок 6.7).

1.2.1. Вибірка усіх значень вимірювань по заданій обсерваторії на заданий часовий інтервал з архіву MPC і заповнення таких позицій внутрішньої бази даних як: номер астероїда, дата і час вимірювання, значення прямого сходження і схилення об'єкта, значення блиску об'єкта, MPC код обсерваторії (при використанні ПЗ CoLiTec заповнюється таблиця "base _ mps" БД "CLTIDB").

1.2.2. Створення запитів до сервісу NASA HORIZONS за вибраними датами, які містять номери астероїдів, дату і час вимірювань, а так само MPC код обсерваторії (аналогічно пункту 1.1.2.).

1.2.3. З метою попередження дублювання запитів до сервісу, отримані відповіді зберігаються у внутрішній БД.

1.2.4. Отримання постійних пластинок кадрів, що відповідають вимірюванням з архіву MPC. Для цього робиться співставлення дати і часу вимірювань з датою і часом сформованих кадрів. Останні містяться у відповідній базі даних ПЗЗ-кадрів обсерваторії (при використанні ПЗ CoLiTec постійні пластинок зберігаються в таблиці "fits" БД "CLTEDB"). Надалі постійні пластинок витягаються з відповідного запису цієї БД.

1.2.5. Перерахунок оцінок екваторіальних координат об'єкту в прямокутну СК ПЗЗ-кадра за допомогою постійних пластинок кадру.

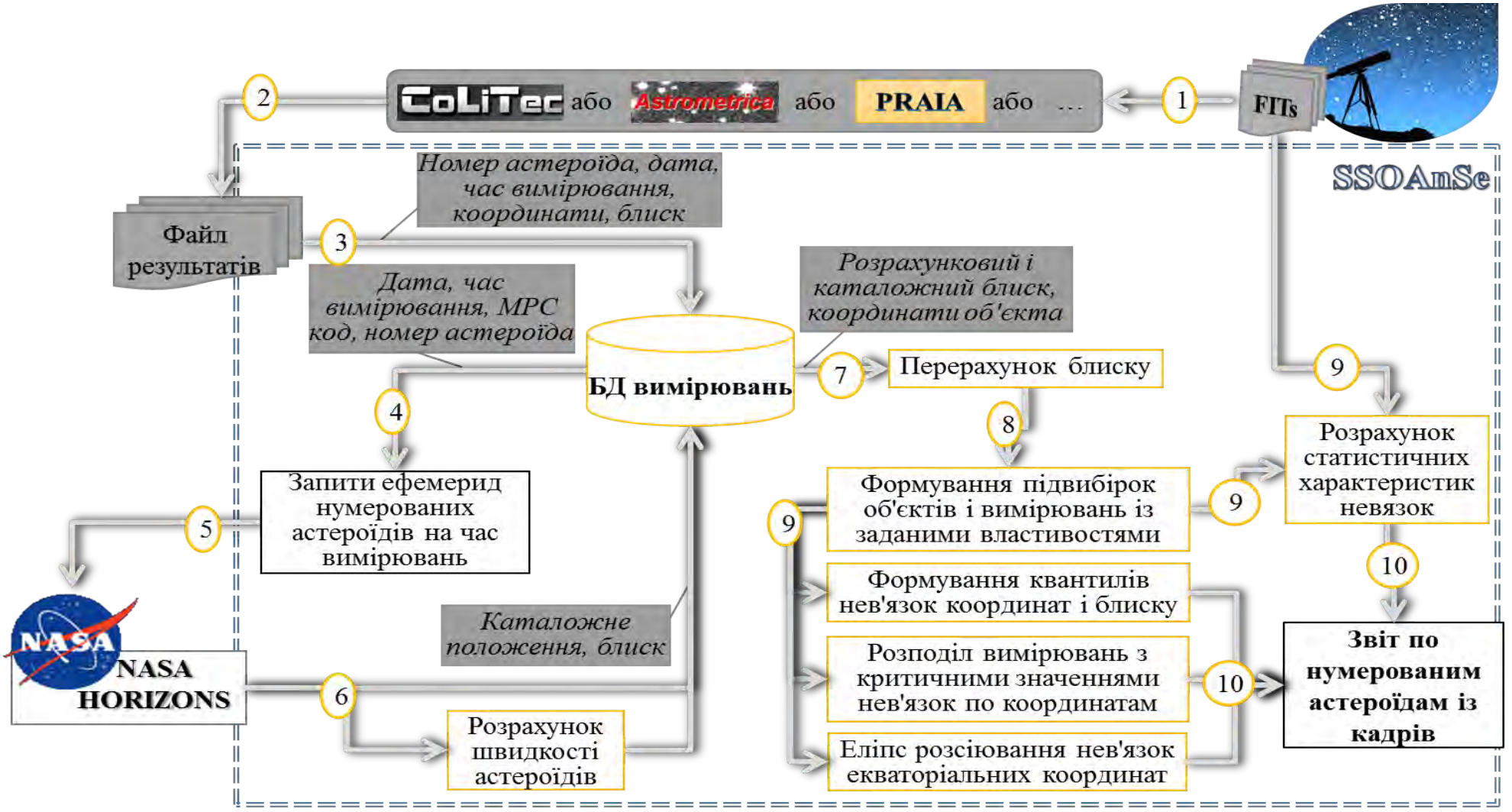


Рисунок 6.7 – Потоки даних при дослідженні точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, що містяться в архіві МРС

2. Перерахунок згідно з формулами (6.27), (6.28) значень блиску астероїдів у фільтрі V (візуальний блиск), отриманих за запитом від сервісу NASA HORIZONS, в нефільтрований блиск.

3. Визначення значень швидкості астероїдів класичним методом за допомогою координат, отриманих від сервісу NASA HORIZONS в п. 1.1.2, 1.2.2.

4. Побудова гістограм розподілу об'єктів по блиску, положенню і швидкості (рисунок 6.8).

5. Групування вимірювань у діапазонах каталожних значень видимого блиску та визначення статичних властивостей оцінок для кожного діапазону і усієї сукупності вимірювань в цілому (таблиця 6.7). Властивості оцінок для вказаних діапазонів і в цілому досліджуються без відбракування значень, з відбракуванням по модулю вектору нев'язок 5 % і 10% вимірювань. Для кожної групи вимірювань виконуються наступні операції (блоки 5.1.-5.4.).

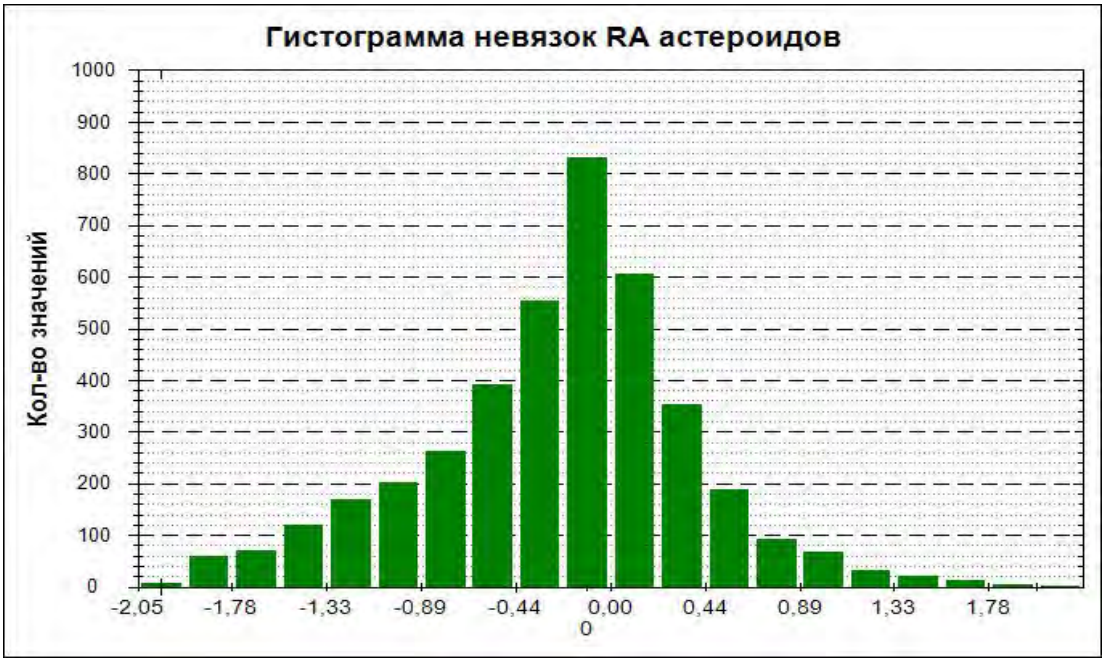


Рисунок 6.8 – Приклад гістограми розподілу
нев’язок прямого сходження об’єктів

Таблиця 6.7 – Основні параметри нев’язок вимірювань для нумерованих астероїдів

Всі вимірювання			
Оброблено вимірювань	247	235	223
Процент відбракування гірших вимірювань, по модулю вектору нев’язок	0%	5%	10%
Середнє нев’язок RA, кут. сек.	-0,06	-0,09	-0,08
Середнє нев’язок DE, кут. сек.	0,08	0,06	0,04
Середнє нев’язок блиск, зір.вел.	-0,13	-0,09	-0,07
Мін. модуль нев’язок RA, кут. сек.	0,00	0,00	0,00
Макс. модуль нев’язок RA, угл. сек.	2,37	1,28	0,98
Мин. модуль нев’язок DE, кут. сек.	0,00	0,00	0,00
Макс. модуль нев’язок DE, кут. сек.	3,31	1,17	0,92
Мін. модуль нев’язок блиску, зір. вел.	0,00	0,00	0,00
Макс. модуль нев’язок блиску, зір.вел.	1,13	0,71	0,60
СКВ нев’язок по RA, кут. сек.	0,58	0,43	0,36
СКВ нев’язок по DE, кут. сек.	0,55	0,38	0,31
СКВ нев’язок по блиску, зір.вел.	0,33	0,28	0,25
Асиметрія нев’язок. по RA	0,92	1,07	4,89
Асиметрія нев’язок по DE	-0,29	-0,28	-0,21
Ексцес нев’язок по RA	4,68	5,07	4,89
Ексцес нев’язок по DE	9,35	9,56	9,42

5.1. Визначення нев'язок між виміряними і каталожними значеннями оцінок екваторіальних координат (RA і DE) об'єктів (6.1), (6.2), оцінок (X і Y) координат об'єктів в прямокутній системі координат ПЗЗ-кадра (6.4), (6.5), а також оцінок блиску об'єктів (6.3).

5.2. Обчислення оцінок середнього зміщення (математичного очікування нев'язок) оцінок положення об'єктів по координатах RA і DE (6.6), (6.7), X і Y об'єктів (6.9), (6.10), а також блиску (6.8).

5.3. Визначення оцінок середньоквадратичного відхилення нев'язок оцінок координат RA і DE (6.11), (6.12), X і Y (6.14), (6.15), а також блиску

об'єкту (6.13).

5.4. Обчислення оцінок коефіцієнтів асиметрії (6.16), (6.17) і ексцесу (6.18), (6.9) екваторіальних координат об'єктів.

6. Побудова залежності нев'язок координат від оцінки блиску об'єктів (рисунки 6.9, 6.10).

7. Формування квантилів нев'язок оцінок екваторіальних координат (RA, DE) і блиску об'єктів.

8. Визначення кількості нев'язок, які перевищили критичні значення і відсоток цих нев'язок від загальної кількості об'єктів (таблиця 6.8).

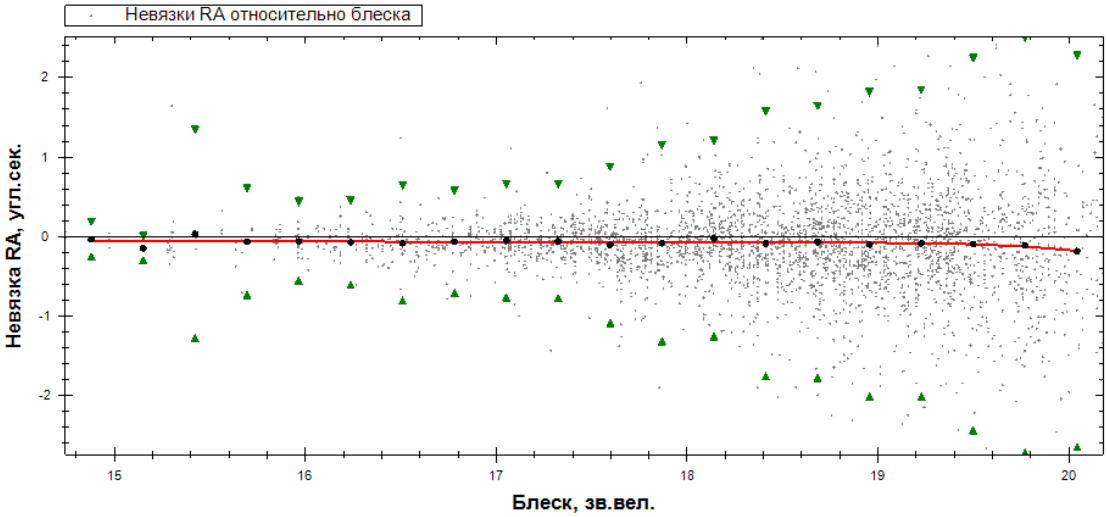


Рисунок 6.9 – Залежність невʼязок по прямому сходженню від оцінки блиску (HORIZONT)

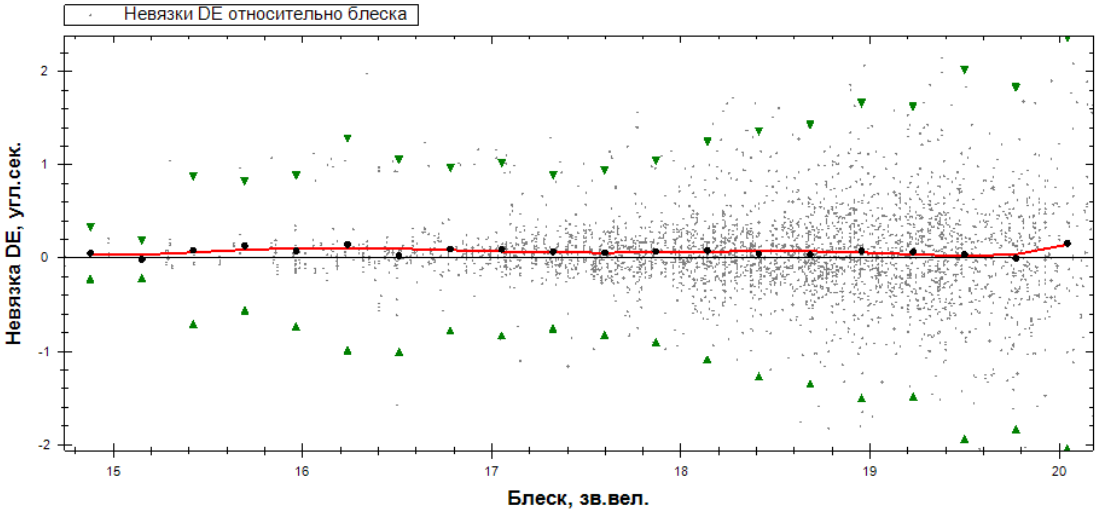


Рисунок 6.10 – Залежність невʼязок по схиленню

від оцінки блиску (HORIZONT)

Таблиця 6.8 – Приклад розподілу вимірювань з критичними значеннями нев’язок по RA

Нев’язка по:	Загальна кількість	Нев’язки <1"	Нев’язки <2"	Нев’язки <3"	Нев’язки <4"	Нев’язки >=4"
% RA	100	85,7	10,0	4,0	0,3	0,0
Кількість вимірювань	321	275	32	13	1	0

9. Побудова графіку еліпса розсіювання нев'язок екваторіальних координат об'єктів по усіх вимірюваннях (рисунок 6.11).

10. Складання звіту за результатами досліджень точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів.

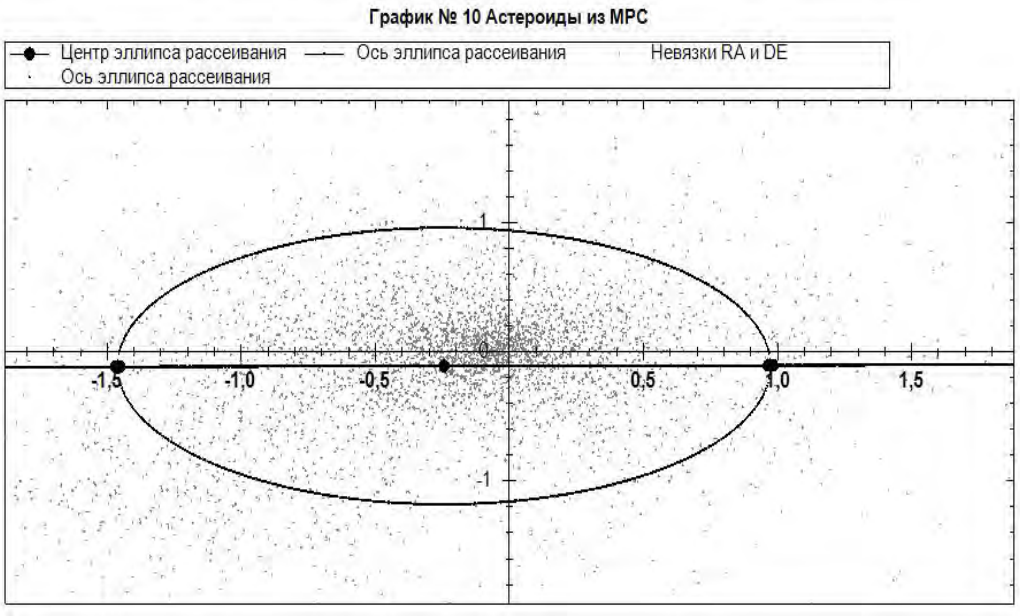


Рисунок 6.11 – Приклад графіка еліпса розсіювання нев’язок екваторіальних координат об’єктів

Результати досліджень. Розроблені методи оцінки показників точності вимірювання і якості виявлення програм обробки кадрів астероїдних оглядів: метод дослідження точності оцінок положення і блиску нумерованих астероїдів, які зберігаються в архіві MPC або містяться у вимірюваннях, які відповідають досліджуваним кадрам.

У якості значення може використовуватися серія кадрів, оброблена за допомогою ПЗ CoLiTec [31] або інших програмних продуктів обробки ПЗЗ-кадрів астероїдних оглядів. Розроблені методи також дозволяють досліджувати вимірювання архіву МРС, і забезпечують можливість аналізу показників точності вимірювання та якості виявлення об'єктів Сонячної системи обсерваторій за будь-який період часу.

В якості еталонних значень положення і блиску астероїдів використовуються дані від сервісу NASA HORIZONS, який надає каталожні ефемериди об'єктів Сонячної системи. Оцінка показників якості виявлення астероїдів на кадрі проводиться за допомогою сервісу MPChecker. За рахунок використання БД, яка містить інформацію про кадри, які досліджуються (дані беруться із заголовків кадрів), використання розроблених методів дає можливість знаходити залежності відхилень від положення на кадрі, а також створювати підвибірки за іншими параметрами.

Розроблені методи дозволяють провести аналіз таких статистичних характеристик вимірювань як оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ) (6.11), (12), (6.13) та середнє відхилення оцінок екваторіальних координат між каталожними і виміряними значеннями (6.6), (6.7), и (6.8). Вони також дозволяють зробити оцінки коефіцієнтів асиметрії (6.16), (6.17) і ексцесу (6.18), (6.19) екваторіальних координат об'єктів.

Створення підвибірок вимірювань за блиском, швидкістю, положенням на кадрі, відношенню сигнал/шум (ВСШ) дає можливість проводити поглиблений аналіз відхилень і виявляти закономірності, які не розрізняються на загальній вибірці. Наприклад, при підвищенні показників яскравості виявлення збільшується кількість вимірювань астероїдів з малим ВСШ. Це призводить до формального погіршення загальних показників точності оцінок координат астероїдів і неправдивих висновків дослідника. Розділення вимірювань по діапазонах ВСШ збільшує розрізненість гіпотез, які досліджуються, і дозволяє вирішити, зокрема, і цю проблему.

Оперативний (зміна аналізованих показників за одну ніч або на заданій сукупності кадрів) аналіз показників точності вимірювання і якості виявлення астероїдів дозволяє визначити результати проведеної модернізації обсерваторій як по частині устаткування, так і по частині програмного забезпечення, а також оцінити найбільш перспективні напрями майбутньої модернізації. Забезпечення оперативності аналізу, який проводиться, також дозволяє спостерігачам оптимізувати налаштування устаткування і програмного забезпечення, яке використовується у спостереженнях.

На сьогоднішній день не існує спеціалізованих автоматичних сервісів і програм оперативного формування і аналізу вказаних властивостей оцінок положення і блиску об'єктів Сонячної системи (ССО). Розроблені методи у рамках досліджень, які проводяться, реалізовані авторами статті в науково-дослідному програмному інструменті SSOAnSe, який є першим інструментом з подібними функціями.

Наукова новизна розроблених методів полягає в розширенні множини сформованих і аналізованих статистичних характеристик. Це забезпечується використанням та аналізом додаткових зовнішніх джерел даних і інформації, отриманої про кадри, які використовуються.

Практична новизна роботи полягає у створенні науково-дослідного програмного інструменту SSOAnSe, який реалізовує розроблені методи та дозволяє проводити аналіз (включаючи оперативний) розширеної множини показників точності вимірювання і якості виявлення астероїдів на розширеній множині аналізованих підвибірок вимірювань та кадрів.

Нині науково-дослідний програмний інструмент SSOAnSe використовується для оцінки характеристик роботи ПЗ CoLiTec. У перспективі передбачається розширення множини статистичних характеристик і розробка методу дослідження точності оцінок положення опорних зір.

7 СТИСЛИЙ ОПИС МЕТОДИКИ ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ВИДИМИХ КООРДИНАТ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ЗА ОПТИЧНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ТА ЇХ ВИСОКОЧАСТОТНИМИ ЕФЕРЕМИДАМИ

Опис вихідних спостережень. Передбачається, що початкові вимірювання видимих координат супутників в результаті оптичних спостережень наведені в топоцентричній системі координат, осі якої паралельні до осей системи координат зоряної каталогу, використаного для виконання вимірювань. Передбачається також, що система усіх зоряних каталогів співпадає з International Celestial Reference System (ICRS) [90]. Для її реалізації використовується International Celestial Reference Frame (ICRF) [90].

Для реалізації цього припущення ПМЗ обробки зображень виконує перетворення координат зірок каталогу і виміряних координат супутника за наступною принциповою схемою:

1. Координати зір приводяться на видимі місця, не обов'язково точно;
2. Обчислюються ідеальні координати зір на зображенні;
3. Визначається зворотне перетворення від координат зір зображення до ідеальних координат зір на зображенні;
4. Виміряні координати супутника на зображенні перетворюються до системи ідеальних координат зір каталогу на зображенні;
5. Використовуються взаємно-зворотні перетворення для пункту 1 і 2 для приведення виміряних видимих координат супутника до координат супутника у системі каталогу.

Припускається, що така схема перетворень послабляє вимоги до точності виконання астрометричних перетворень з пунктів 1 і 5 при приведенні координат зір на видимі місця і зменшує вірогідність проникнення систематичної помилки у вимірювання координат супутника внаслідок похибок астрометричних перетворень.

Умова взаємно-зворотності перетворень у пунктах 1, 2 і 5, а також існування точного перетворення за пунктом 3 забезпечує вимірювання координат супутника в топоцентричній системі координат з осями, паралельними до осей системи координат опорного зоряного каталогу.

В результаті такого підходу можна проводити спостереження, які можливо порівнювати, навіть при істотно різних методах обробки зображень. Тоді величина систематичної помилки вимірювань кутових координат, викликана неточністю астрометричних перетворень буде завжди мала.

Опис ефемерид, які використовуються для порівняння. У даній роботі проводиться порівняння виміряних координат супутника з ефемеридами, які надаються International Laser Ranging Service (ILRS), [73] і International Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Service [74]. Обидві ці служби публікують свої ефемериди у вигляді таблиць моментів часу і декартових координат супутника, які відповідають їм в Internation - al Terrestrial Reference Frame (ITRF).

Для отримання координат і швидкостей супутника у довільний момент часу таблиці координат (ефемериди) необхідно інтерполювати.

ILRS ефемериди. Ефемериди ILRS, публікуються у форматі Consolidated Prediction For - mat (CPF) [93]. Для їх читання та інтерполяції використано програмне забезпечення [96], розроблене авторами цього звіту.

У описі формату [93] для інтерполяції таблиці положень ШСЗ рекомендується використати поліноми Лагранжа. Обчислювальна процедура для інтерполяції за допомогою поліномів Лагранжа, який лежить в основі ПМЗ Orekit [85], має складність $O(n^2)$ [72], де n – ступінь інтерполюючого полінома плюс 1. Існує багато схем обчислення значень для вже відомих поліномів, які мають складність $O(n)$ [3]. У разі, коли виникає потреба неодноразового обчислення значень для того самого інтервалу інтерполяції, як наприклад у задачі порівняння спостережень з ефемеридею, проміжні результати обчислень можуть бути збережені і використані повторно.

Повторне використання проміжних результатів інтерполювання може забезпечити істотний приріст швидкості обчислень за рахунок реалізації таких додаткових можливостей:

- обчислення похідних довільного порядку шляхом аналітичного диференціювання інтерполяційних поліномів (необхідне для обчислення миттєвого вектору швидкості);
- кешування інтерполюючих поліномів для повторного використання;
- у разі використання таблиць постійного кроку, частина обчислень для визначення коефіцієнтів може бути виконана заздалегідь і може повторно використовуватися при обчисленні нових поліномів.

Інтерполяція на краях таблиці може призводити до зниження точності інтерполяції. ПМЗ [96] дозволяє уникати інтерполювання на краях таблиці.

ILRS ефемерида являє собою прогноз майбутніх положень супутника по відношенню до моменту фактичних спостережень супутника і моменту її публікації. Тобто ILRS ефемерида - це екстраполяція положень супутника в майбутнє. ILRS ефемериди охоплюють проміжок часу від однієї доби для низькоорбітальних супутників і до 7 днів для високоорбітальних супутників. Тоді точність ефемериди швидко погіршується з віддаленням від її початку. Більшість ефемерид перекриваються за часом. Для супутників, які розглядаються в цій роботі, проміжок часу однієї ефемериди знаходиться в діапазоні від 4 до 6 днів. Ефемериди для них, як правило, оновлюються один раз на добу.

Для обчислення положення супутників на великих інтервалах часу (більше 1 доби) використовується останній прогноз, передуючий даному моменту часу. Таким чином, зазвичай, для визначення положення і швидкості супутника по ILRS ефемеридах використовуються прогнози положення супутника, віддалені від початкової дати прогнозу не більш ніж на одну добу.

GNSS ефемериди. Ефемериди, які надає International GNSS Service і використані в роботі публікуються в sp3 форматі у системі координат Global

Reference Frame (IGb08) [53]. Для їх читання, інтерполяції і подальших перетворень координат використовувалася низькорівнева бібліотека для космічної динаміки Orekit [85].

Ефемериди, які використовуються GNSS публікуються через тиждень після проведення спостережень. Ці GNSS ефемериди є аплікацію спостережень навігаційних супутників з урахуванням виміряних параметрів обертання Землі. Наслідком цього є більш висока точність GNSS ефемерид порівняно з ILRS ефемеридою.

Одна ефемерида, яка публікується International GNSS Service, охоплює проміжок в 23 години і 45 хвилин і публікується один раз на добу. Кожна GNSS ефемерида розглядається бібліотекою Orekit як окрема незалежна ефемерида. Для інтервалів більших 1 доби декілька ефемерид об'єднуються ПМЗ [96] у послідовність ефемерид. Таким чином, при використанні GNSS ефемерид утворюється розрив у часі між ефемеридами тривалістю 15 хвилин, зазвичай в районі півночі за всесвітнім часом. Тоді на краях окремих ефемерид може спостерігатися деяке зниження точності внаслідок крайових ефектів інтерполяції.

Методика порівняння вимірювань видимих координат супутника з його положенням по ефемериді. Вимірювання супутників провадиться в системі координат ICRF, а ефемериди публікуються в системі координат ITRF [90]. Для їх порівняння необхідно виконати перетворення вимірювань і положень за ефемеридами в одну загальну систему координат. У якості такої системи координат в ПМЗ [96] нині використовується топоцентрична СК з осями, паралельними до осей системи координат GCRF [90].

Координати супутника Землі зазвичай обчислюються в геоцентричній системі координат [73], тому при перерахунку їх до видимих координат, вони не спотворюються через річну аберацію [14]. Координати зірок каталогу визначені в системі координат ICRF і піддаються спотворенню внаслідок річної аберації. Якщо при обробці зображень для зірок каталогу і супутника

виконувалися взаємно зворотні перетворення, то координати супутника будуть спотворені на величину річної аберації.

Одиничний вектор, який вказує на об'єкт з урахуванням величини аберації, викликаної переходом між двома системами координат, що рухаються одна відносно одної, визначається як (формула враховує поправку відповідно до спеціальної теорії відносності) [14]:

$$\mathbf{s} = \frac{1}{1+\left(\mathbf{s}_0 \cdot \frac{\mathbf{v}}{c}\right)}\left[\frac{\mathbf{s}_0}{\gamma} + \frac{\mathbf{v}}{c} + \frac{\gamma-1}{\gamma}(\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}\right], \quad (7.1)$$

де $\mathbf{s}$ – одиничний вектор, що вказує на об’єкт із врахуванням аберації; $\mathbf{s}_0$ – одиничний вектор, що вказує на об’єкт до врахування аберації; c – швидкість світла у вакуумі; $\mathbf{v}$ – швидкість руху системи координат;

$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v}}{v}$, де v – довжина вектору швидкості системи координат;

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

Для врахування річної аберації вектор v є вектором руху Землі в системі координат ICRF, яка обчислюється відповідно до ефемериди DE430 [62].

Координати і швидкості супутника за ефемеридами перетворюються в загальну систему координат за наступною схемою:

1. Координати і швидкості супутника з системи координат ITRF перетворюються в систему координат GCRF відповідно до рекомендацій IERS2010 [90].

2. Обчислюються координати і швидкості пункту спостереження в системі координат GCRF, як перетворення координат пункту з ITRF (у якій вони відомі) в GCRF.

3. Обчислюється відстань між супутником і місцем спостереження у момент вимірювання видимих координат супутника як $d = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{site}|$, де $\mathbf{r}$ – вектор положення супутника в GCFR; $\mathbf{r}_{site}$ – вектор положення місця спостереження в момент проведення вимірювань координат супутника t_{obs} в GCFR. Момент часу для вектора положення супутника $t = t_{obs} - \tau$. При першій ітерації $\tau = 0$

4. Обчислюється затримка в часі між моментом розсіювання світла на супутнику і приходом сигналу до місця спостереження $\tau = d / c$, де c – швидкість світла у вакуумі.

5. Координати і швидкість супутника коригуються з урахуванням затримки часу в припущенні руху супутника по кеплеревій орбіті. (пункти 3-5 можуть бути виконані декілька разів за необхідності).

6. Обчислюються топоцентричні координати і швидкості супутника в системі координат з осями, паралельними до осей системи координат GCRF, як різниці векторів координат і швидкостей супутника і пункту спостереження в системі координат GCRF.

Після приведення спостережень і координат супутника до загальної системи координат можна виконати порівняння між ними. Порівняння можна виконувати як традиційним способом в екваторіальних координатах (α – пряме сходження, δ – схилення), так і в термінах розкладання нев'язок вздовж і поперек видимої траєкторії руху супутника.

У програмі вимірювання подаються у вигляді одиничного вектору напряму візування **s**. Напрям візування на супутник $\mathbf{s}_e$ легко обчислюється на підставі його декартових координат **r**:

$$\mathbf{s}_e = \frac{\mathbf{r}}{r}, \tag{7.2}$$

де r – довжина вектора **r**.

Порівняння в екваторіальних координатах. Одиничні вектори напрямів візування можуть бути описані у вигляді екваторіальних координат. Різниці цих координат

$$\Delta\delta = \delta - \delta_e$$
$$\Delta\alpha\cos\delta = (\alpha - \alpha_e)\cos\delta \qquad (7.3)$$

характеризують відмінності між спостереженнями і ефемеридею. Оскільки різниці прямих сходжень для різних схилень відповідають різним довжинам дуг на одиничній сфері їх доводиться нормувати на $\cos\delta$. При цьому нехтуємо величиною $\Delta\delta$ в порівнянні з величиною $\cos\delta$. Враховуючи, що звичайна величина $\Delta\delta$ зрідка перевищує декілька кутових секунд таке припущення буде правильним за виключенням малого околу полюса світу.

Порівняння в термінах вздовж і поперек видимої траєкторії руху супутника. Найважливіша особливість оптичних спостережень супутників пов'язана з їх високою рухливістю на зображенні порівняно з іншими астрономічними об'єктами. У типовій ситуації видиме зміщення супутника за час експозиції зображення перевищує кутові розміри функції розсіяння точкових об'єктів. Це призводить до витягування зображення супутника уздовж його напряму руху, якщо телескоп супроводжує зорі, або до витягування зображень зір, якщо телескоп супроводжує супутник. Таким чином, при обробці зображень виникає виділений напрям, який співпадає з напрямом руху супутника

Окрім витягування зображень точкових об'єктів, висока швидкість видимого руху ШСЗ підвищує вимоги до точності вимірювання моментів часу експозиції зображення ШСЗ порівняно з типовими вимогами, які пред'являються до астрономічних зображень. Так для низькоорбітальних об'єктів видима кутова швидкість супутника може перевищувати 1000" за секунду часу. Для вимірювання координат такого об'єкту з точністю близько 0.1", точність вимірювання часу повинна перевищувати 0.0001 секунд. Помилки вимірювання часу будуть проявлятися у вигляді зміщення положення об'єкту уздовж його видимої траєкторії.

Враховуючи ці особливості бажано розглядати відхилення вздовж і поперек видимого руху супутника. У разі відомих топоцентричних координат супутника **r** та його вектору швидкості **v** можна ввести миттєву систему координат як (рис. 7.1)

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{r}}{r}, \mathbf{j} = [\mathbf{k} \times \mathbf{i}], \mathbf{k} = \frac{[\mathbf{r} \times \mathbf{v}]}{\|[\mathbf{r} \times \mathbf{v}]\|}, \quad (7.4)$$

де **i**, **j**, **k** – орти системи координат (вісь x напрямлена вздовж напрямку на ШСЗ, вісь y співпадає з видимим напрямком руху ШСЗ, вісь z – перпендикулярна видимому напрямку руху ШСЗ); r – довжина вектору **r**.

Вектор **k** перпендикулярний площині рисунка. Вектор відхилень $\Delta\mathbf{s} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_e$ може бути розташований на координаті (dR, dL, dN) в системі координат (7.4). Компонента вектору відхилень dR завжди буде другого порядку мализни, зважаючи, що довжина вектору відхилень завжди мала (рис. 7.2). Видима кутова швидкість руху ШСЗ визначається як $v_{vis} = \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{j})}{r}$. Тоді відставання або випередження ШСЗ по видимому шляху в термінах часу можна оцінити як $dT = \frac{dL}{v_{vis}}$.

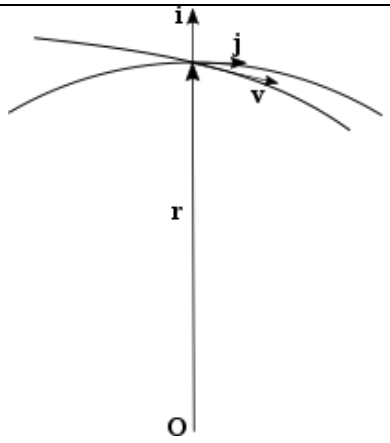


Рис. 7.1 – Система координат вздовж і поперек видимого шляху супутника. Всі вектори лежать в площині рисунка.

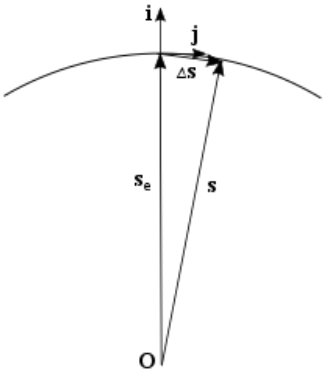


Рис. 7.2 – Розташування вектору відхилень на dR і dL компоненти.

Методика оцінки статистичних характеристик відхилень.

Пошук і цензурування грубих помилок вимірювань. Програми обробки зображень можуть проводити цензурування грубих помилок вимірювань, а можуть і не проводити. В силу цього в вимірюваннях координат ШСЗ можуть бути присутніми грубі помилки. Для їх виявлення і подальшого цензурування застосовується наступна процедура.

1. Для відхилень вздовж (*dL*) і поперек (*dN*) видимого шляху ШСЗ окремо оцінюється середнє значення як $\overline{x} = \frac{\sum_i x_i}{n}$, де x_i –величина, що вимірюється. Додавання ведеться тільки по вимірюваннях, які задовольняють критерію (7.5), а вимірювання, які містять грубі помилки відкидаються. При обчисленні середнього значення вперше використовуються усі вимірювання. n – кількість вимірювань, що задовольняє критерію (7.5).

2. Оцінюється величина стандартного відхилення як $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \overline{x})}{n-1}}$. Як і в попередньому пункті сумування ведеться тільки за вимірюваннями, які задовольняють критерію (7.5), по кожній координаті окремо.

3. Для розподілу Стьюдента [19] оцінюється квантиль $t_{\alpha,n} = F_n^{-1}(\alpha)$, де F_n^{-1} – обернена функція розподілу випадкової величини. n – число степенів свободи розподілу Стьюдента, яке дорівнює кількості вимірювань, що задовольняють критерій (7.5). α – ймовірність помилкового відкидання випадкової величини.

4. Виконувався пошук грубих помилок вимірювань за умовою

$$\left(x_i < \overline{x} + t_{\alpha,n}\sigma\right) \text{ or } \left(x_i > \overline{x} - t_{\alpha,n}\sigma\right). \quad (7.5)$$

При знаходженні грубих помилок пункти 1-4 повторюються. В іншому випадку алгоритм завершує роботу і повертає маску для вимірювань, які задовольняють критерію (7.5), по кожній координаті окремо.

5. Загальне вимірювання визнається грубою помилкою, якщо по одній із координат (вздовж або поперек видимого шляху) виявлена груба помилка вимірювань.

Далі для кожного вимірювання і кожної координати нев'язок (*dL* і *dN)* окремо обчислюється ймовірність виявлення відхилення нев'язки від її середнього значення як $\alpha_{i,x} = 0,5 - \left| F_n\left(\frac{x_i - \overline{x}}{\sigma_x}\right) - 0,5 \right|$, F_n – функція розподілу Стьюдента. *n* – кількість вимірювань, які задовольняють критерій (7.5) по кожній координаті окремо.

Обчислені значення ймовірності відхилення вимірювання дозволяють при подальшому аналізі нев'язок вводити рівні цензурування грубих помилок вимірювань.

8 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПМЗ CoLiTec НА ТЕЛЕСКОПАХ АСТРОНОМІЧНИХ ОБСЕРВАТОРІЙ УКРАЇНИ

8.1 Результати досліджень та тестування ПМЗ CoLiTec з автоматизованої обробки зображень штучних супутників Землі, малих тіл Сонячної системи та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопом ОМТ-800 НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова

Робота виконувалася в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, які тестувалися:

ПМЗ CoLiTecSat;

ПМЗ CoLiTecAS;

ПМЗ CoLiTecVS.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Для тестування ПМЗ CoLiTecSat були проведені спостереження таких об’єктів: 2 ШСЗ на геосінхронних орбітах – LUCH (міжнародний код 2014-058A, NORAD ідентифікатор 40258), BEIDOU G5 (2012-008A, 38091) та два КА на середньовисотній орбіті – COSMOS 2501 (GLONASS) (2014-075A, 40315), COSMOS 1989 (ETALON 1) (1989-001C, 19751).

Спостереження проводилися у режимі трекінгу (супроводження).

Дані КА були обрані в першу чергу через високу точність відомих параметрів їх орбіт, що дозволяє перевірити точність позиційних спостережень за допомогою ПМЗ, яке досліджується.

Для тестування ПМЗ CoLiTecAS використані кадри ПЗЗ OMT-800 багатьох ділянок зоряного неба з розмірами 59x59 аркмінут.

Для тестування ПМЗ CoLiTecAS були виконані спостереження ділянки зоряного неба навколо змінної зорі NY Ser.

Інструмент

OMT-800 — 800 мм дзеркально-лінзовий телескоп, фокусна відстань 2140 мм, без світлофільтрів, ПЗЗ-камера FLI ML09000, 3056 x 3056 пкс (без бінування), розмір пікселя 12 мкм, робота в режимі супроводу.

ЕОМ, на який було встановлено відповідні продукти

ПМЗ було встановлено на комп'ютері HP Compaq Elite 8300 (Intel Core i5-3470, RAM 12 GB, NVIDIA NVS 300, HDD 500 GB) з ОС Windows 7 Pro x64; швидкість доступу до Інтернет – до 100 Мб/с.

Перевірка інсталяції продукту

Перевірка інсталяції CoLiTecSat

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану папку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка інсталяції CoLiTecAS

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану папку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка інсталяції CoLiTecVS

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану папку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – Центр управління, вьювер LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій постобробки серій кадрів

Для тестування CoLiTecSat було використано 1286 кадрів із зображеннями 4-х КА з експозицією від 1 до 4 сек.

Обробка здійснювалась у 3 потоки, а у якості опорного каталогу був обраний онлайн-каталог UCAC5.

Результати обробки:

З 1286 кадрів зредуковано 1256, не вдалося обробити взагалі 30, тобто менш ніж 2,5 % від загальної кількості.

Таблиця 8.1.1 – Кількість необроблених та оброблених кадрів.

NORAD ід.	Тип орбіти	Оброблено	Не оброблено
40258	GEO	21	0
38091	GEO	812	4
40315	MEO	192	12
19751	MEO	231	14

Більшу частку необроблених кадрів отримано при спостереженнях MEO в режимі супроводу.

Час обробки одного кадру 1-4 хвилин, в деяких випадках до 7 хвилин.

Для тестування ПМЗ CoLiTecAS у звітний період використані кадри ПЗЗ ОМТ-800 ділянок зоряного неба з експозиціями від 16 сек до 60 сек.

Результати обробки:

ПМЗ CoLiTecAS демонструє 100 % обробку матеріалу, який спостерігається в автоматичному режимі. Використання функції складання серії кадрів дає збільшення граничної зоряної величини спостережень на телескопі на 1-1.5 одиниць, аж до 20.5 з. в. Завдяки цим факторам вдається в межах кадра виявити треки переважної кількості каталогізованих астероїдів, і тому збільшити вірогідність відкриття невідомих астероїдів або комет.

Для тестування ПМЗ CoLiTecAS були проведені спостереження змінних зірок NY Ser і SDSS J151253.97+231748.4, а також контрольних незмінних зірок ділянки зоряного неба навколо.

Результати обробки:

За результатами фотометричних вимірювань отримані криві зміни блиску зорь з СКВ не більше 0,01 з. в. СКВ блиску постійних зірок – від 0.003 до 0.01 з.в.

Перевірка якості отриманих результатів

Потрібні КА було добре видно у вювері LookSky. Звіт про спостереження у доступних форматах був успішно сформований.

Перевірка точності отриманих оцінок координат проводилася через онлайн-сервіс, наданий НДІ АО ОНУ (Рис 8.8.4÷8.8.7, табл. 8.8.11, 8.8.12). Для порівняння на сервер надсилалися оцінки координат, які були отримані на даних серіях за допомогою іншого ПМЗ обробки астрономічних кадрів (APEX II). Перевірка оцінок блиску не проводилась.

Отримані оцінки точності позиційних вимірювань у цілому не відрізняються від оцінок, отриманих за допомогою іншого ПМЗ. СКВ для КА не перевищувало 1 кутової секунди вздовж орбіти та поперек.

Якість позиційних вимірювань астероїдів та комет за допомогою ПМЗ CoLiTecAS підтверджена розміщенням у базі даних MPC (Minor planet center IAU).

Якість фотометричних вимірювань зірок за допомогою ПМЗ CoLiTecVS (Рис. 8.10.33÷8.10.46) оцінювалась по СКВ контрольних постійних зірок – від 0.003 до 0.01 з.в. та заслуговує високої оцінки і демонструє цілком зрозумілу кореляцію з відношенням сигнал/шум, тобто з зоряною величиною.

Висновки

ПМЗ CoLiTec (CoLiTecSAT, CoLiTecAS, CoLiTecVS) встановлюється достатньо просто без зауважень та помилок. Інтерфейс ПМЗ зрозумілий,

візуалізація процесу обробки зроблена добре, головні неявні особливості вьюера LookSky достатньо описані у наявній документації.

Переваги:

- автоматизація процесу обробки спостережень, у тому числі в режимі «онлайн»;

- великий вибір опорних зоряних каталогів (онлайн та оффлайн), включаючи найбільш сучасні;

- точність оцінок координат об’єктів не гірша ніж в інших ПМЗ;

- можливість вибору формату файлів результатів.

Слід зауважити, що ПМЗ CoLiTecAS впроваджено для обробки кадрів ОМТ-800 протягом останніх 3-х років, і за його допомогою знайдено декілька невідомих астероїдів.

Отримані показники впровадження ПМЗ CoLiTecVS відповідають якості, достатній для планування і обробки спостережень змінних зірок на ОМТ-800.

Виявлені помилки.

А) На деяких кадрах були виявлені помилки програми оцінки положення об’єктів.

В) У деяких випадках CoLiTecAS не виявляє дифузні зображення відносно яскравих комет.

Відомості про всі виявлені помилки були направлені до розробників, частина з них вже усунена.

Зауваження та пропозиції

1. Корисна була б функція попередньої фільтрації окремих хибних вимірювань.

2. Є необхідність оптимізувати використання дискового простору, тому що співвідношення розміру робочого дискового простору до сумарному обсягу вихідних файлів (приблизно 5/1) видається досить високим.

8.2 Результати досліджень та тестування ПМЗ CoLiTec для автоматизованої обробки зображень малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопом КТ-50 НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (перша частина)

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, що тестувалися - CoLiTecAS.

CoLiTecAS – один з модулів програмного забезпечення **CoLiTec** для астрометричної і фотометричної обробки ПЗЗ спостережень малих тіл Сонячної системи. Відмінною особливістю цього ПО є можливість ефективного автоматичного пошуку всіх рухомих об'єктів у полі зору, що робить перспективним його використання для обробки архівів ПЗЗ спостережень екліптичної зони, які отримані в інших наукових темах.

В рамках даної роботи досліджувалися можливості використання **CoLiTecAS** для виконання астрометричних та фотометричних редукцій ПЗЗ кадрів телескопа КТ-50 з астероїдами головного пояса в моменти взаємних зближень і астероїдів, які наближаються до Землі, зокрема потенційно-небезпечних об'єктів.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Об’єктами досліджень були обрані астероїди головного поясу в період взаємних зближень з масиву спостережень, які були отримані в ніч з 9 на 10 листопада 2018 р. Спостереження цих об’єктів планується використати у подальшому для обчислення мас астероїдів, які можна визначити динамічним методом, тому отримання високої позиційної точності координат

є вкрай важливим. Оброблено 59 кадрів 9 астероїдів пакетами **CoLiTecAS** та Astrometrica (v.4.11.1.442) у різних комбінаціях опорних каталогів Gaia DR2, UCAC4, UCAC5, APASS DR9. Порівняння виконувалось з використанням опорного каталогу Gaia DR2. В табл.1 наведено деякі характеристики астероїдів, які могли вплинути на точність отриманих результатів.

Таблиця 8.2.1 – Характеристики обраних астероїдів.

Ast	RA	DEC	Elev,	mag	Exp, s
(35)	01 13 51.6	+14 27 10	56.4	14.0	100
131	00 06 09.17	-05 14 14	37.8	14.3	100
363	00 08 49.9	-06 01 13	37.1	13.2	100
2239	23 22 45.8	-07 55 03	35.2	15.8	100
2670	07 44 04.8	+23 14 55	66.2	16.1	120
3441	23 22 41.2	-07 56 48	35.2	16.8	120
4192	23 54 11.7	-00 25 47	42.7	16.4	16.4
5043	00 32 14.0	+01 59 30	45.0	16.9	120
50379	03 54 11.7	+02 24 08	31.4	15.3	120

В таблиці 8.2.1 наведено топоцентричні координати прямого сходження, схилення, висоти над горизонтом та видимої зоряної величини на момент спостереження середнього кадру в серії відповідно до ефемериди JPL, останній стовбець містить час експозиції об’єкта.

Результати порівняння подано у табл. 8.2.2. У таблиці 8.2.2 наведено отримані значення остаточних різниць $(O - C)_{\alpha,\delta}$ та їх середньоквадратичних похибок, де O – топоцентричні положення, отримані зі спостережень, C – положення відповідно до ефемериди лабораторії JPL системи HORIZONS.

Таблиця 8.2.2 – Результати обробки астероїдів головного поясу, які отримані пакетами **CoLiTecAS** та **Astrometrica.**

Obj	CoLiTecAS					Astrometrica				
	N	(O-C)$_\alpha$,	СКП$_\alpha$, mas	(O-C)$_\delta$, mas	СКП$_\delta$, mas	N	(O-C)$_\alpha$, mas	СКП$_\alpha$, mas	(O-C)$_\delta$, mas	СКП$_\delta$, mas
(35)	6	60	39	114	46	6	55	23	63	12
131	5	28	26	9	88	6	34	12	11	22
363	5	7	35	140	75	6	60	34	84	23
2239	6	-19	76	44	173	6	38	94	6	139
2670	8	166	69	127	105	8	138	79	0	91
3441	6	142	292	104	262	6	214	270	126	245
4192	7	5	187	53	238	7	52	191	260	178
5043	5	35	214	104	126	6	87	203	6	201
50379	8	16	128	86	157	8	3	79	46	113

Дані таблиці свідчать про високу точність позиційних вимірювань пакету **CoLiTecAS** як в випадковому так і в систематичному відношенні. Дані для таблиці 1 отримані в режимі ручного вимірювання. Результати, отримані у режимі автоматичного вимірювання цих об’єктів, значно відрізняються. До безперечних достоїнств пакета слід віднести можливість ефективного автоматичного пошуку рухомих об'єктів у кадрі, зручний і швидкий процес візуалізації та вимірювання модуля Look Sky, особливо це помітно на слабких об’єктах.

Астероїди, які наближаються до Землі (АНЗ), зокрема потенційно – небезпечні об’єкти (ПНО).

Оброблено 31 кадр 5-ох АЗЗ:

2001KQ1(10), 2014JO25(6), 1993PC(6), 2008TZ3(4), 1999KW4(5).

Майже всі об’єкти були знайдені у автоматичному режимі, час обробки однієї серії складав від 6 до 23 хвилин.

Інструмент

Апертура, фокусна відстань, наявні фільтри, камера, яка застосовується (модель, розміри світлоприймальної поверхні у пікселях, розмір окремого пікселю), режими роботи (оглядові, спостереження, супровід).

Телескоп КТ-50 комплексу «МобіТел»: оптична система телескопа – Максутова, діаметр дзеркала – 0.5 м, фокусна відстань – 3.0 м, ПЗЗ камера Alta U9000 - розмір приймача: (37×37) мм, розмір пікселя: (12×12) мк, система програмного управління на базі ЕОМ, GPS служба часу, мобільна платформа, оснащено стандартним фільтром V системи Джонсона – Казінса, режим роботи – дрейф-скан

ЕОМ, на який було встановлено відповідні продукти

PC ОС Windows 7 professional x32. Intel Celeron 2.5 GHz, 4Gb ОЗП, об'єм жорсткого диску – 1.5Tb, доступ до мережі Інтернет з Proxy сервером.

Ноутбук HP Probook, ОС windows 7 professional x64, Intel i5, 2.67 GHz, 4Gb ОЗП, об'єм жорсткого диску – 500 Gb, доступ до мережі Інтернет швидкість до 50 Мбит/с.

Перевірка інсталяції продукту

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так - LookSky
5	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так- Центр управління 3С, LookSky
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми 3С?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій постобробки серій кадрів.

Результати обробки серій модулем 3С подані на Рис. 8.2.1

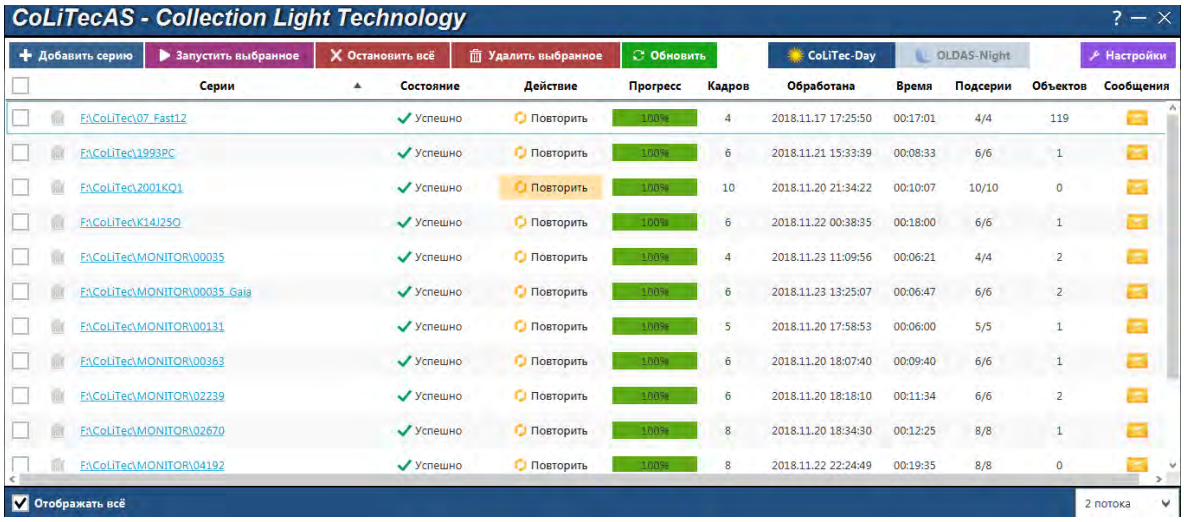


Рис. 8.2.1. Результати обробки серій спостережень телескопа КТ-50 та тестової серії модулем 3С.

1. Чи використовувалися калібрувальні кадри, якщо так, то які?

Калібрувальні кадри не використовувалися.

2. Чи виконувалось складання кадрів? - Ні.
3. Кількість ядер процесора, які використовувалися для обробки. - 2
4. Час, який був витрачений на обробку серії у хвилинах. Від 6 до 23 хв.
5. Результати обробки, їх вигляд у в'ювері кадрів (посилання на малюнок).
6. Виявлені помилки під час обробки серії.

Перевірка якості отриманих результатів

Чи всі рухомі об’єкти були виявлені? Чи багато хибних об’єктів?

Всі цільові об’єкти були виявлені. Окрім програмних на кадрах, знайдено також інші астероїди, які не були виміряні при обробці пакетом «Astrometrica».

Чи вдалося сформувати необхідні звіти?

Так

Методика перевірки точності отриманих оцінок координат або блиску.

Оцінка точності отриманих положень перевірялась обчисленням СКП остаточних різниць (O - C) з ефемеридою HORIZONS лабораторії JPL.

Результати перевірки точності отриманих оцінок координат та порівняння з результатами обробки у пакеті «Astrometrica» наведено у таблиці 8.2.1.

Висновки

На ОС windows 7 Professional (x32, x64) пакет **CoLiTecAS** встановлюється просто та швидко без зауважень та помилок. Інтерфейс програми досить зручний та інтуїтивно зрозумілий. До безсумнівних переваг пакета слід віднести можливість ефективного автоматичного пошуку рухомих об'єктів в досить великому полі зору (поле КТ -50 сягає 40′x40′), зручний та швидкий процес візуалізації і вимірювання модуля Look Sky. Програма має можливість роздільного вибору опорного каталогу для астрометрії та фотометрії, що є корисним для користувача у деяких випадках. Можливість використовувати каталог APASS DR9 для виконання фотометричних редукцій є дуже корисним для отримання точної інформації про зоряні величини досліджуваних об'єктів.

У цілому програма CoLiTecAS складає позитивне вражання і є безперечно конкурентно-спроможною національною розробкою у галузі дослідження тіл Сонячної системи поряд з іншими продуктами у світі.

Виявлені помилки.

(Перераховане нижче носить характер зауважень і побажань, які можливо виникли внаслідок обмеженого часу особистої експлуатації тестованого продукту)

1. Модуль 3C видаляє всі файли, крім робочих fit-файлів, з папки серії, поданої на обробку. У деяких випадках це може бути небажаним.

2. У керівництві користувача написано, що підтримуються різні комбінації дати та часу. Наш формат «2018-11-09:20: 32: 38.7" не був розпізнаний програмою як допустимий.

3. Бажано було б мати опцію, яка уточнює до якого моменту спостереження, відноситься час в “шапці” вихідного файлу. У нашому випадку наприклад, пишеться час середини експозиції.

4. Координати виявлених об'єктів не змінюються при зміні ступеня оптичного полінома і полінома астрометричної редукції з 5 на 3.

Кількість виявлених об'єктів (на окремих серіях) при використанні різних опорних каталогів (UCAC4 і Gaia DR2) буває різним (в настройках змінювався тільки опорний каталог).

8.3 Результати досліджень та тестування ПМЗ CoLiTec для автоматизованого спостереження штучних супутників Землі, малих тіл Сонячної системи та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопами ЧВ-400 та BRC-250 ЛКД ДВНЗ Ужгородський національний університет

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, що тестувалися - CoLiTecAS, CoLiTecVS, CoLiTecSAT.

CoLiTecAS – один з модулів програмного забезпечення **CoLiTec** для автоматизованого виявлення астероїдів, астрометричної та фотометричної обробки ПЗЗ спостережень малих тіл Сонячної системи.

Для тестування даного продукту були вибрані зображення змінної зорі CL Tri, яка досить часто спостерігалась в ЛКД УжНУ в 2017-2018 рр.. З обраних 9-ти ночей спостережень вибрано по 4-5 рівновіддалених у часі кадрів (зазвичай проміжок між ними становив від 5 до 10 хв.). Кадри вибирались таким чином, щоб вибрана нами серія з 4-5 кадрів була

розташована максимально високо над горизонтом в момент спостережень. Це забезпечило нам найкращу якість зображень і відповідно, більшу проникну здатність на зображеннях з малим часом експозиції, який становив 15-30 секунд. Таким чином ми отримали 9 серій, які обробили за допомогою **CoLiTecAS.** Результати подані у таблиці 8.3.1. У першому стовпчику – дата спостережень; у другому – експозиція; у третьому – кількість астероїдів знайдених програмою; у п'ятому – мінімальна зоряна величина; у шостому – кількість хибних астероїдів, які знайдено програмою.

Таблиця 8.3.1 – Результати тестування **CoLiTecAS.**

Дата	**Час експозиції**	$\mathbf{N_{аст}}$	$\mathbf{m_{мін}}$	$\mathbf{N_{хибних}}$
2017-11-27	20	3	16.95	0
2018-01-14	20	4	17.21	4
2018-01-15	20	0	-	0
2018-10-05	25	1	16.88	1
2018-10-06	25	1	16.21	0
2018-10-09	10	0	-	0
2018-10-11	10	1	12.49	0
2018-10-15	10	0	-	-
2018-10-31	10	0	-	-

CoLiTecVS – наступний модуль ПЗ CoLiTec, який дозволяє виконувати фотометричну обробку змінних зір.

В ЛКД УжНУ цей продукт був протестований на прикладі 2 серій – змінних зірок AB And та CL Tri (Рис. 8.10.17. - 8.10.32.).

Перша з них (AB And) містить 55 кадрів, телескоп ЧВ-400, апертура 400мм, фокусна відстань 1750мм, розмір кадру 1528x1528, розмір пікселя 0.024мм, кутовий розмір пікселя 2.84''/pix, фільтр B).

CoLiTecSAT – останній з перерахованих продуктів програмного комплексу. Дозволяє отримати координати штучних супутників Землі. Тестування проводилося шляхом обробки зображень без добового ведення, або в режимі ведення об'єкта.

Назва телескопа	D(мм)	F(мм)	Роздільна здатність (кут.сек. на піксель)	Поле зору телескопа (куг. мін.)	Бінірування	Спосіб синхронізації затвору
UZHH_BRC250	250	1280	1.46	100	2x2	GPS PPS

Обробка зображень також виконувалася за допомогою програми Apex II.

Список ШСЗ для яких були отримані вимірювання координат подані у таблиці 8.3.2.

Таблиця 8.3.2 – Статистика кількості серій вимірювань координат по кожному ШСЗ

Ім'я супутника	Norad ID	Висоти супутника (км)	Кількість серій зображення		
			загальне	CoLiTecSAT	Apex II
Galileo-102	37847	23220	1	1	1
Galileo-203	40544	23220	1	1	1
Galileo-205	40889	23220	1	1	0
Galileo-212	41860	23220	1	1	1
Etalon-1	19751	19100	1	1	1
Glonass-134	40315	19100	1	1	1
Beidou G5	38091	35800	4	4	3

Таблиця 8.3.2 – Статистика кількості серій вимірювань координат по кожному ШСЗ (продовження)

Ім'я супутника	Norad ID	Висоти супутника (км)	Кількість серій зображення		
IRNSS 1B	39635	35800	1	1	1
Lageos-1	08820	5900	3	3	0
Всього	–	–	14	14	9

Оцінка систематичної і випадкової помилки вимірювань за спостереженнями з телескопом UZHH_BRC250. Кількість вимірювань для ШСЗ Galileo - 102 (37847), Galileo - 203 (40544), Galileo - 205 (40889), Galileo - 212 (41860), отриманих з телескопом UZHH _ BRC250, у кожній серії менше або дещо більше 10 (Таблиця 8.8.4-8.8.7). СКОВ одного вимірювання сильно варіюються від супутника до супутника, що викликано малою кількістю вимірювань. З одного боку, мала кількість вимірювань перешкоджає виявленню грубих помилок. З іншого боку, грубі помилки у свою чергу можуть призводити до істотно завищених оцінок СКВ.

Для геосинхронного ШСЗ IRNSS 1b (41860) з телескопом UZHH _ BRC250 було отримано більше 20 вимірювань, що дозволило виявити і відкинути ряд грубих помилок вимірювань (Таблиця 8.8.8). Серед вимірювань, які бралися для порівняння з ефемеридами, у CoLiTecSAT було виявлене 3 грубих помилки, а у Apex II одна. При цьому Apex II відкинув на 1 грубу помилку більше ніж CoLiTecSAT на попередньому етапі, перед порівнянням з ефемеридею.

У таблиці 8.8.9 подані оцінки СКВ для геостаціонарного ШСЗ Beidou G5 (38091). Для Apex II було виявлено 5 грубих помилок у 52 вимірюваннях, а для CoLiTecSAT - 3 грубих помилки при тій самій кількості вимірювань.

У всіх розглянутих випадках, коли вимірювання проводилися за допомогою Apex II і CoLiTecSAT, оцінка величини □F не ставала меншою за 0,001. Таким чином, відмінності в оцінках СКВ по UZHH_BRC250 не дозволяють зробити висновок про те, яке ПМЗ забезпечує меншу випадкову помилку вимірювань.

Оцінки СКВ одного вимірювання уздовж видимого шляху ШСЗ знаходяться в діапазоні від 0,33 до 1,8 кут. секунди, а у поперечному напрямі - від 0,1 до 1,9 кут. секунди. Мала кількість вимірювань і досить високий рівень СКВ одного вимірювання не дозволяють зробити однозначний висновок про наявність або відсутність систематичних зміщень між вимірюваннями і ефемеридею. Відносно високий рівень СКВ може бути

обумовлений низьким рівнем роздільності, оскільки усі зображення були отримані при бінуванні 2, що призводить до оцінки кутової роздільності зображення 2.9" на піксель. Таким чином СКВ в перерахунку до пікселів знаходиться в діапазоні від 0,11 до 0,66, що можна порівнювати за величиною з результатами для телескопів з великою кутовою роздільністю.

Інструмент

Телескоп Т400: оптична система телескопа – Ньютон, діаметр дзеркала – 0.4 м, фокусна відстань – 1750 мм, ПЗЗ камера FLI PL9000 - розмір чіпа: (37×37) мм, розмір пікселя: (12×12) мк, GPS служба часу, оснащено стандартними фільтрами B, V, R системи Джонсона, режим роботи – огляд, супровід.

Телескоп BRC-250M: оптична система телескопа – Бейкер Річі Кретйен, діаметр дзеркала – 0.25 м, фокусна відстань – 1268 мм, ПЗЗ камера Alta F16M - розмір чіпе: (37×37) мм, розмір пікселя: (9×9) мк, GPS служба часу, режим роботи – огляд, супровід.

ЕОМ, на який було встановлено відповідні продукти

PC ОС windows 7 professional x64. AMD Athlon 5350 2.05 GHz, 4Gb ОЗП, об'єм жорсткого диску – 1Tb, доступ до мережі Інтернет.

PC ОС windows 7 professional x64. Intel Core i7 3 GHz, 16Gb ОЗП, об'єм жорсткого диску – 1Tb, доступ до мережі Інтернет.

Віртуальна машина під управлінням ПЗ VirtualBox з параметрами - PC ОС windows 7 professional x32. Intel Core i5 3 GHz, 4Gb ОЗП

Перевірка інсталяції продукту

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале	Так
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні

4	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так - LookSky
5	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так- Центр управління 3С, LookSky
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми 3С?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій постобробки серій кадрів.

Результати обробки серій модулем 3С представлені рис.8.3.1

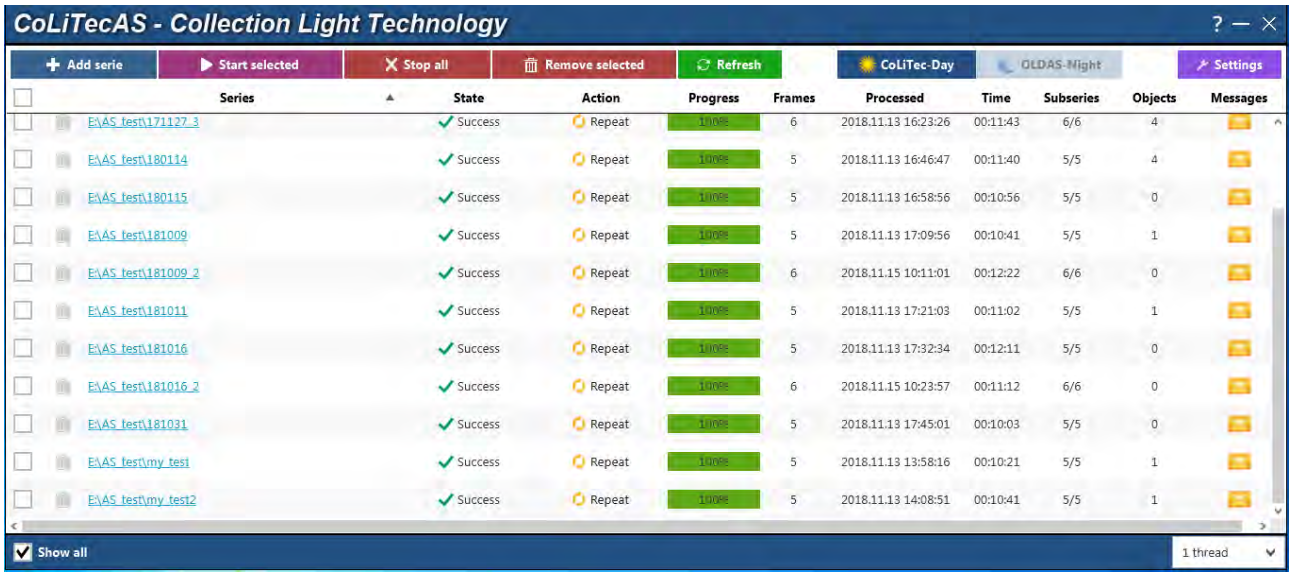


Рис. 8.3.1. Результати обробки серій спостережень телескопа Т-400 та тестової серії модулем 3С.

Чи використовувалися калібрувальні кадри, якщо так, то які?

Калібрувальні кадри не використовувалися.

Чи виконувалось складання кадрів? - Ні.

Кількість ядр процесора, які використовувалися для обробки. – 2-8

Час, який був витрачений на обробку серії у хвилинах. Від 4 до 18 хв.

Виявлені помилки під час обробки серії. Помилки виникають внаслідок надання програмі некоректних кадрів, як то кадри з поганим веденням або відсутністю зірок.

Перевірка якості отриманих результатів

Чи всі рухомі об’єкти були виявлені? Чи багато хибних об’єктів?

Всі цільові об’єкти були виявлені.

Чи вдалося сформувати необхідні звіти?

Так

Висновки

На ОС Windows 7 Professional (x32, x64) пакет **CoLiTec** встановлюється просто та швидко без зауважень та помилок. Інтерфейс програми досить зручний та інтуїтивно зрозумілий. До безсумнівних переваг пакета слід віднести можливість ефективного автоматичного пошуку рухомих об'єктів у досить великому полі зору (поле BRC-250M досягає 80′x80′), зручний і швидкий процес візуалізації та вимірювання модуля Look Sky. Програма має можливість роздільного вибору опорного каталогу для астрометрії та фотометрії, що є корисним для користувача в деяких випадках. Можливість використовувати каталог APASS DR9 для виконання фотометричної редукції є дуже корисним для отримання точної інформації про зоряні величини досліджуваних об'єктів.

В цілому програма CoLiTec складає позитивне враження і є безперечно конкурентно-спроможною національної розробкою у галузі дослідження тіл Сонячної системи поряд з іншими продуктами у світі.

Виявлені помилки.

(Перераховане нижче носить характер зауважень і побажань, які можливо виникли внаслідок обмеженого часу особистої експлуатації тестованого продукту)

1. Модуль 3C видаляє всі файли, крім робочих fit, з папки з серією, поданої на обробку. У деяких випадках це може бути небажаним.

2. Бажано було б мати опцію, яка уточнює, до якого моменту спостереження відноситься час в “шапці” вихідного файлу. У нашому випадку наприклад, пишеться час середини експозиції.

3. Час обробки серії з декількох кадрів є занадто довгий, а в деяких випадках користувач не отримує інформацію по проблеми обробки (як то відсутність інтернету і т.д).

8.4. Результати досліджень та тестування ПМЗ CoLiTec для автоматизованого спостереження астероїдів та змінних зір на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопом АЗТ-8 НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, які тестувалися (CoLiTecVS)

Проводилися випробування ПМЗ **CoLiTecVS**.

ПМЗ використовувалось для проведення обробки серії ПЗЗ-кадрів змінник зір.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Для дослідження були обрані змінні зорі VS12183 та VS1598, які присутні на серіях ПЗЗ-кадрів отриманих під час фотометричних спостережень астероїдів головного поясу та транснептунових об'єктів. Оскільки обрані змінні зорі не завжди знаходяться поблизу центра ПЗЗ-кадра, можна оцінити якість фотометричного вирівнювання ПМЗ **CoLiTecVS** на краях зображень.

Інструмент

Для отримання серій ПЗЗ-кадрів використовувався 70-см дзеркальний телескоп АЗТ-8, фокусна відстань 2800мм, у стандартному світлофільтрі R, камерою MicroLine ML4710, з розміром матриці 1056 x1027 пікселів, без бінування, розмір пікселя 0.013 мм, що становить 0.94 кутових секунди на небі.

ЕОМ, на яку було встановлено відповідні продукти

Для тестування, ПМЗ **CoLiTecVS** було встановлено на ЕОМ з наступними характеристиками:

1. CPU: Intel Core i5-3470;
2. ОЗП: 32 GB DDR3;
3. HDD: 1 TB, 7200 rpm, кеш 64 Мб;
4. швидкість доступу до Інтернет до 20 Mb/s;
5. Windows Server 2012 x64.

Також тестування проводилось і з використанням ОС Linux Debian 8 x64.

Перевірка інсталяції продукту

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану папку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – Центр управління, вьюер LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – Центр управління, вьюер LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми ЗС?	Проблеми з з'єднанням з базою даних. Вирішується шляхом

		відкриття повного доступу до папки з програмою, що не дуже надійно та небезпечно для даних.
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій постобробки серій кадрів.

При тестуванні ПМЗ **CoLiTecVS** було оброблено серії ПЗЗ-кадрів. Перша серія складається з 65 кадрів, а друга з 66 кадрів у стандартному світлофільтрі R. Експозиції були по 180 секунд. Для вирівнювання кадрів також були отримані відповідні набори службових кадрів з Flat-field (плоскими полями) та Dark-Field (темновими полями). Обробка здійснювалась паралельно у 4 потоках.

Результати обробки

Результати отриманих кривих блиску змінної зорі 12183 показані на Рис. 8.10.46. - 8.10.62.

Декілька серій ПЗЗ-кадрів, в яких у “шапці” не було координат центру кадру, через проблеми з доступом до сервісу Astrometry.net не було проведено обробку. Уся необхідна інформація щодо частково оброблених та необроблених серій була надіслана розробнику ПМЗ.

Загальний час обробки даних становить близько 90 хв.

7. Перевірка якості отриманих результатів

Для перевірки якості отриманих кривих блиску змінних зір були проведені порівняння з аналогічними даними отриманих за допомогою програмного забезпечення MaxIm DL для первісної обробки даних (вирівнювання та центрування кадрів) та отримання фотометрії за допомогою програмного забезпечення Munipack з SExtractor. Результати порівняння показують дуже високу точність отримання кривих блиску за допомогою ПМЗ **CoLiTecVS** незважаючи на напівавтоматичний метод обробки. Для

сучасних автоматизованих спостережень та в часи великих масивів даних, хотілось би мати повністю автоматичний метод отримання кривих блиску, без вказування зір порівнянь. Більше того, хотілось би зосередити увагу авторів на отримання масової фотометрії. А також з використанням математичних методів, провести аналіз кривих блиску всіх об'єктів, які знаходяться на серіях ПЗЗ-кадрів та визначити які об'єкти мають бути «стандартами», відносно яких проводять порівняння. Це дасть можливість визначити криву блиску зір більш точно, а також отримати кандидатів на нові змінні зірки.

Висновки

ПМЗ **CoLiTecVS** встановлюється достатньо просто без зауважень та помилок. Інтерфейс ПМЗ достатньо інтуїтивно зрозумілий, візуалізація процесу обробки зроблена добре. Основні особливості встановлення та використання ПМЗ **CoLiTecVS** достатньо добре описані у наявній документації.

Переваги:

1. Високий рівень автоматизації процесу обробки спостережень, зокрема у режимі «онлайн»;
2. Вказуються досліджуваний та порівняльні об'єкти тільки у першому кадрі, а на всіх інших кадрах обробка виконується автоматично;
3. Точність отриманих кривих блиску об'єктів не гірша ніж у інших ПМЗ;

Відомості про всі виявлені помилки були направлені до розробників, частина з них вже усунена.

Зауваження та пропозиції

1. Виникають проблеми при редукції з використанням сервісу Astrometrica.net. Необхідно використовувати самодостатнє ПМЗ, яке збереже від великої кількості помилок інших авторів та сервісу.
2. Розробити алгоритм «масової» фотометрії, який дасть більш широкі можливості у провадженні ПМЗ.

3. Створити більш універсальне ПМЗ, яке виконує обробку даних для отримання астрометричної та фотометричної інформації як для нерухомих об’єктів та і для рухомих (астероїдів, супутників тощо).

8.5 Результати досліджень та тестування ПМЗ CoLiTec з автоматизованого спостереження штучних супутників Землі на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопом Цейс-600 Андрушівської астрономічної обсерваторії

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукт, який тестувався - CoLiTecSat

Проводилися випробування ПМЗ CoLiTecSat.

ПМЗ використовувалось для проведення спостереження об’єктів техногенного походження на геостаціонарних орбітах.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Для тестування ПМЗ були використані спостереження 2-х об’єктів з номерами Норад 14248 і 17125 від 15 жовтня 2018 р.

Спостереження проводилися у режимі з виключеним добовим веденням.

Інструмент

Цейс-600 см з коректором-редуктором поля в первинному фокусі, фокусна відстань 1160 мм, без світлофільтрів, ПЗЗ-камера FLI PL16803.

ЕОМ, на який було встановлено відповідні продукти

ОС: Win 7 Pro x64. CPU: Intel Pentium 3508 1.90 GHz, ОЗП: 4 GB.

Перевірка інсталяції продукту

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – Центр управління, аніматор LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з'явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – Центр управління, аніматор LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми 3С?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Так. Ім'я комп'ютера містить нелатинські символи, що привело до зависання програми.
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій обробки серій кадрів.

Всього було оброблено 2 серії кадрів по 12 окремих зображень супутників:

Обробка здійснювалась у 2 потоки, в якості опорного каталогу був обраний локальний каталог UCAC3.

Результати обробки

Повністю оброблено обидві серії.

Загальний час обробки: 42 хв.

В форматі TTL результати обробки мають наступний вигляд:

СИСТ 1

151018 18093050 23431706 -05195028 001067

151018 18094250 23432872 -05190224 001067

151018 18095450 23434035 -05181548 001067

151018 18100650 23435199 -05172862 001067

151018 18254450 23590249 -04155478 001066

151018 18255650 23591416 -04150788 001065

151018 18260850 23592585 -04142118 001065

END

СИСТ 2

151018 18310950 23494647 -05010880 001081

151018 18312150 23495791 -05001978 001080

151018 18313350 23500936 -04593086 001081

151018 18314550 23502077 -04584247 001081

151018 18471750 00050997 -03553209 001080

151018 18472950 00052142 -03544400 001081

151018 18475350 00054434 -03530649 001082

END

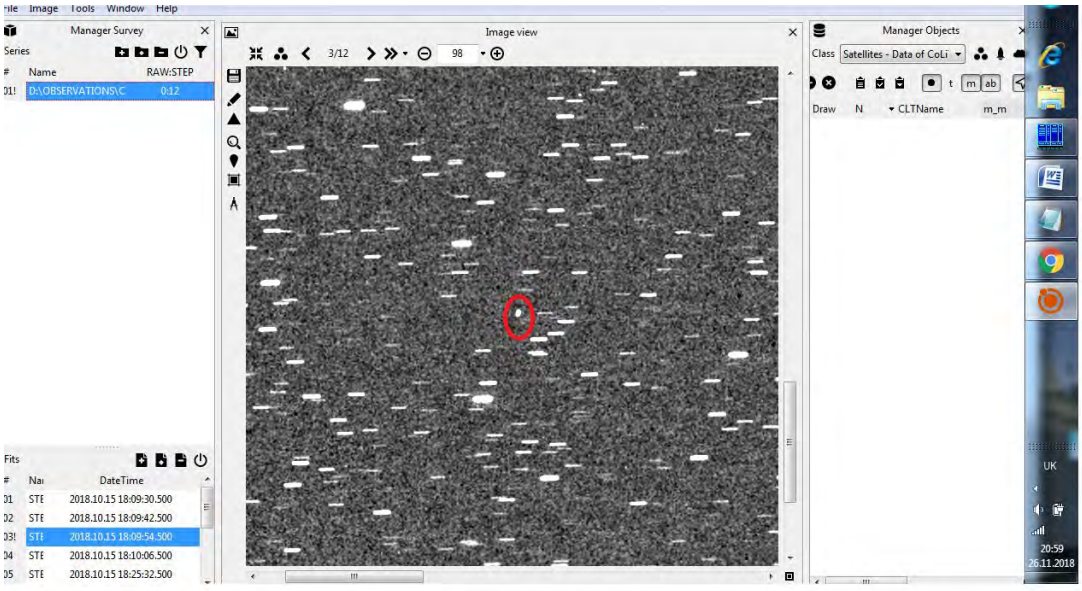


Рис. 8.5.1. Приклад зображення ШСЗ на кадрі без добового ведення

Перевірка якості отриманих результатів

Обидва об’єкти були розмічені у LookSky в ручному режимі. Під час першого запуску LookSky програма зависла через нелатинські символи в імені комп’ютера, що варто віднести до тимчасових недоліків ПМЗ.

Зривів блінкування кадрів серії у LookSky не було.

Перевірка точності отриманих оцінок координат проводилася шляхом порівняння з аналогічними оцінками, які були отримані на даних серіях за допомогою альтернативного ПМЗ; різниця між ними склала ±0,1-0,3 кутових секунди у прямому піднесенні та схиленні, що є позитивним результатом для об’єктів такого класу.

При цьому оцінки блиску суттєво відрізняються не на користь CoLiTecSat, тому роботу в цьому напрямку доцільно продовжити.

Висновки

ПМЗ CoLiTecSat є надійним і ефективним інструментом астрометричної обробки кадрів, отриманих без добового супроводу телескопа, коли зображення опорних зірок на кадрах є штрих-подібними. Саме у такому режимі зазвичай спостерігаються об’єкти на геоцентричних орбітах.

Зауваження та пропозиції

1. Слід виправити помилку фотометричних оцінок об’єктів;

2. Доцільно знайти ресурси для подальшого скорочення часу обробки;

3. Дуже бажаним є створення режиму автоматичного детектування об’єктів без участі оператора або в інтерактивному режимі.

8.6. Тестування ПМЗ CoLiTec для автоматизованої обробки зображень малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів з телескопом КТ-50 НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (друга частина)

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, які тестувалися - CoLiTecAS.

Проводилися випробування CoLiTecAS, тобто одного з модулів ПМЗ CoLiTec, який створено для обробки ПЗЗ спостережень малих тіл Сонячної системи. Випробування торкалося визначення зручності використання цього модуля та його ефективності і точності при обробці спостережень НДІ МАО для пошуку рухомих об'єктів на серіях ПЗЗ кадрів.

ПМЗ також використовувалось для проведення обробки спостережень малих тіл Сонячної системи з телескопом КТ-50 НДІ МАО та оцінки можливості його використання безпосередньо під час спостережень.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Для обробки були вибрані окремі серії ПЗЗ спостережень 2011-2013рр. у режимі переносу заряду, які виконуються при нерухомому телескопі. Дані спостереження цікаві тим, що їх вже накопичено в НДІ МАО більше 30 тис. за останні 7 років і є висока вірогідність знаходження додаткових цікавих об'єктів Сонячної системи на цих зображеннях. Для першого тестування було відібрано 100 fits файлів у 13 серіях спостережень в зоні екліптики, де з більшою вірогідністю можуть бути такі об'єкти.

Було також проведено симуляцію використання ПМЗ при спостереженнях відомих малих тіл Сонячної системи. У цьому випадку тестувалась можливість використання ПМЗ під час таких спостережень. Також для відомих астероїдів досить добре обраховано параметри орбіт і вони можуть бути використані для перевірки точності обробки за допомогою ПМЗ.

Всі спостереження проводилися у режимі нерухомого телескопу.

Інструмент

Телескоп КТ-50 комплексу «МОБІТЕЛ»: оптична система телескопа – Максутова, діаметр дзеркала – 0.5 м, фокусна відстань – близько 3.0 м, ПЗЗ камера Alta U9000 - розмір чіпа: (37×37) мм, розмір пікселя: (12×12) мкм, система програмного управління на базі ЕОМ, GPS служба часу, мобільна платформа, оснащено стандартним фільтром V системи Джонсона – Казінса, працює в режимі переносу заряду при нерухомому телескопі.

ЕОМ, на які було встановлено відповідні продукти

1: Desktop, CPU Intel Core i5-4570 3.2GHz, RAM 24 GB DDR3, HDD 2TB + SSD 250GB, ОС Windows Server 2008 R2 Standart;

2: Notebook, CPU Intel Core i3-3110M 2.4GHz, RAM 16 GB DDR3, HDD 1TB + SSD 250GB, ОС Windows 7 Pro SP1 x64; швидкість доступу до мережі Інтернет 30 Mb/s.

Перевірка інсталяції продукту

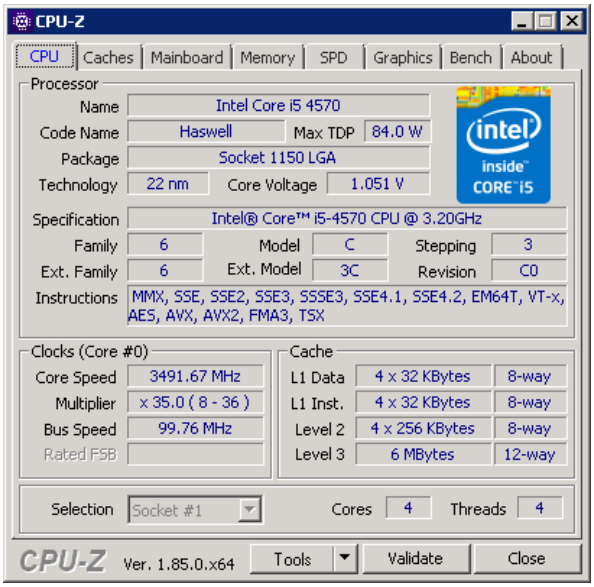
№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале?	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану теку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції?	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції?	Ні
4	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск?	Так – 5 шт. в теку "Всі програми\ CoLiTecAS" , url CoLiTec, ліцензійна

		угода, центр керування, LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі?	Так – 2 шт. Центр управління, LookSky
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми 3С?	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky?	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора?	Ні

Перевірка виконання операцій пост-обробки серій кадрів.

З використанням тестової серії було проведено перевірку масштабування та стабільності обробки в залежності від кількості потоків та вплив носія з даними на швидкість обробки. В тестуванні використовувались процесор з 4 фізичними ядрами та процесор з 2 ядрами та 4-ма потокам (Рис. 8.6.1.). ПМЗ було встановлено на твердотільні диски в обох випадках. У якості носія використовувались жорсткі диски 7200 та 5400 обертів/хв, твердотільні диски та віртуальні диски в ОЗП. Перевірка роботи з різними носіями була цікава тим, що при обробці серії об'ємом близько 71МБ створюються тимчасові та проміжні файли загальним об'ємом близько 1490МБ.

Отримано результати, показані в Табл. 8.6.1. За 100% продуктивності взято величину, обернену до часу виконання обробки серії на твердотільному диску в одному потоці на відповідному процесорі.



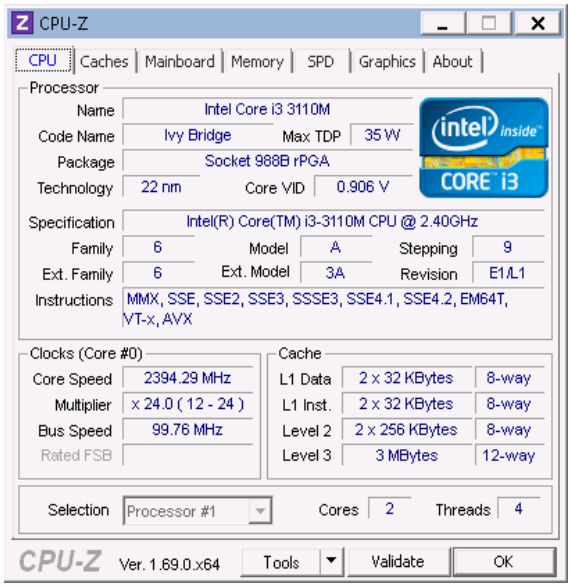


Рис. 8.6.1. Параметри процесорів тестових ПК.

Таблиця 8.6.1. Результати перевірки масштабування ПМЗ.

Кількість потоків ПМЗ	Ядра/потоки CPU/диск	Середня ефективність потоку	Сумарна продуктивність, %	Примітки
1	2/4 i3 SSD	1,00	100,00	
1	2/4 i3 HDD	1,00	100,00	Багато вільного ОЗП
1	2/4 i3 RAM	1,03	103,50	
2	2/4 i3 SSD	0,87	173,00	
3	2/4 i3 SSD	0,73	217,00	
4	2/4 i3 SSD	0,59	235,00	
1	4/4 i5 SSD	1,00	100,00	
2	4/4 i5 SSD	1,00	200,00	
3	4/4 i5 SSD	0,99	297,40	
4	4/4 i5 SSD	0,92	368,00	
4	4/4 i5 HDD	0,92	368,00	Багато вільного ОЗП
4	4/4 i5 HDD	0,87	349,00	Активна робота HDD
4	4/3 i5 HDD	0,80	320,00	Один потік зайнято на 100% іншим процесом

Було визначено, що при достатньому рівні вільного ОЗП різниці у швидкості роботи з HDD та SSD дисків немає, т.я. дискові операції добре кешуються ОС. При роботі на віртуальному диску в ОЗП є прискорення при обробці однієї серії приблизно на 3%. В одному з експериментів було відзначено, що при зміні числа потоків ПМЗ після зупинки на паузу подальша обробка виконується некоректно - запускаються додаткові програми, які викликають помилки (Рис. 8.6.2., 8.6.3.). Хочеться також відзначити хороше масштабування та незначний вплив інших процесів, які виконуються на ПК на сумарну продуктивність ПМЗ.

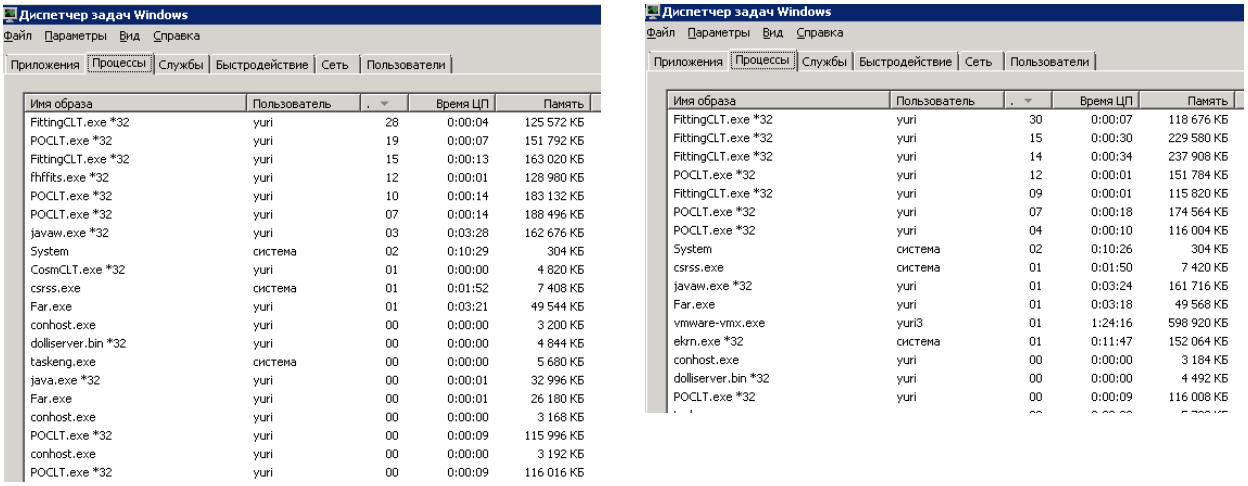


Рис. 8.6.2. Робота програм ПМЗ після зміни числа потоків з 4 на 3.

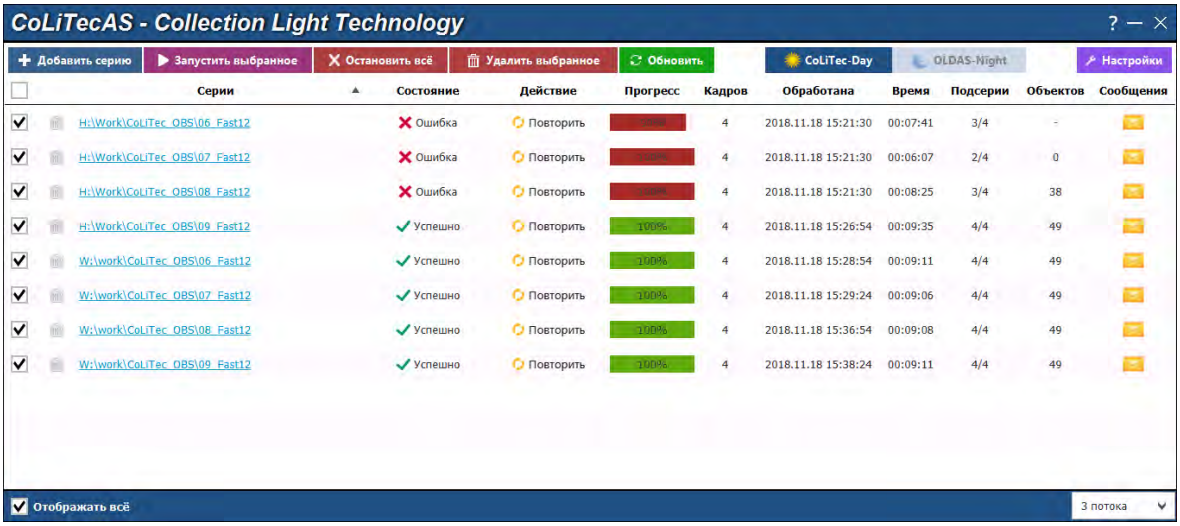
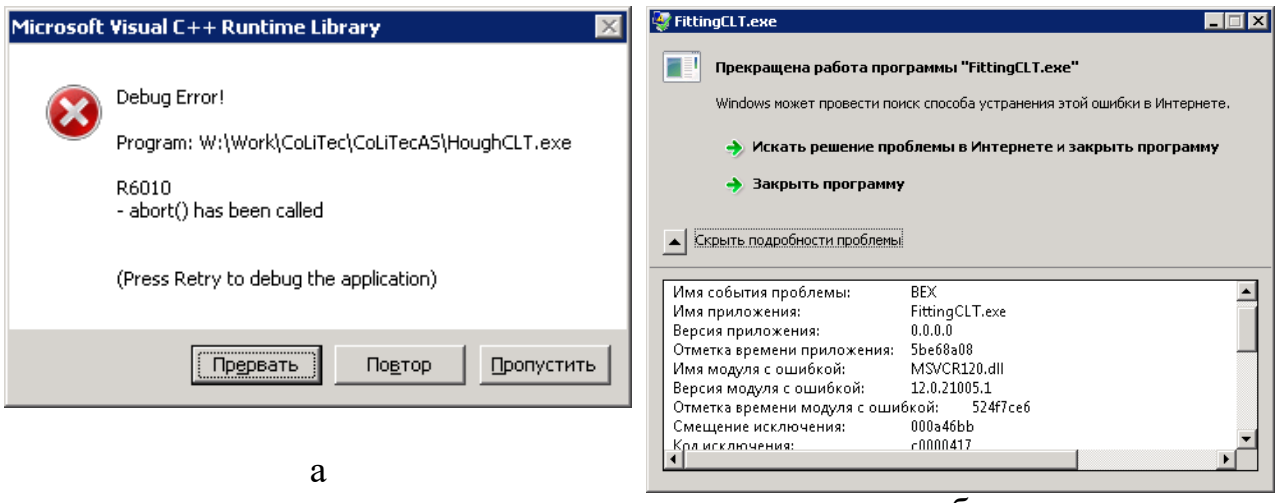


Рис. 8.6.3. Збої при обробці серій після зняття з паузи після зміни числа потоків з 4 на 3.

Наступним кроком була обробка 100 fits-файлів з розміром 3056 на близько 2720 пікселів (точний розмір залежить від схилення) у 13 серіях спостережень в зоні екліптики для пошуку рухомих об'єктів. Для виконання цього завдання було створено програму, яка формує окремі під-серії з великої серії спостережень, оскільки типовий сценарій спостережень протяжних площадок в режимі вкороченого переносу заряду дає серії кадрів зі зміщенням центру кадру на 5-10 кутових хвилин від кадру до кадру. В режимі “Day” такі кадри не обробляються з видачею помилки “исключен из обработки из-за несоответствия RA/DE центра”. Також в тестових цілях було проведено фільтрацію деяких підсерій первинних ПЗЗ зображень для виключення дефектів матриці. Основна обробка здійснювалась в 3 потоки на 4-х ядерному процесорі, у якості опорного каталогу був обраний онлайн-каталог GAIA. Калібрувальні кадри не використовувалися, т.я. у вибраних програмах спостережень вони не створювались. Складання кадрів не виконувалось. Обробка однієї підсерії з 5 кадрів в середньому займала від 7 до 8 хв., з 8 кадрів — від 17 до 18 хв. В процесі роботи іноді виникали помилки в модулі HoughCLT.exe (Рис. 8.6.4.(а)), значно частіше були помилки в модулі FittingCLT.exe (Рис. 8.6.4.(б)). У першому випадку обробка не проходила, в другому випадку обробка завершувалась успішно.



а б

Рис. 8.6.4. Окремі помилки при роботі ПМЗ

Всі серії оброблено (обраховано) і на 12 серіях було виявлено рухомі об'єкти. Частина об'єктів була ототожнена ПМЗ з відомими астероїдами з каталогу Міжнародного планетного центру (Рис. 8.6.5.). Деяка частина виявилась помилковим детектуванням гарячих пікселів на ПЗЗ матриці, які при переносі заряду перетворюються на стовпці. У цілому було отримано декілька десятків рухомих об'єктів різної природи. Після належної перевірки окремі результати будуть відіслані до міжнародного центру даних малих планет. На жаль, в режимі віддаленого доступу до робочого столу зображення в програмі Look Sky відтворюється у кольоровому вигляді (Рис. 8.6.5.), що дещо утруднює роботу з програмою.

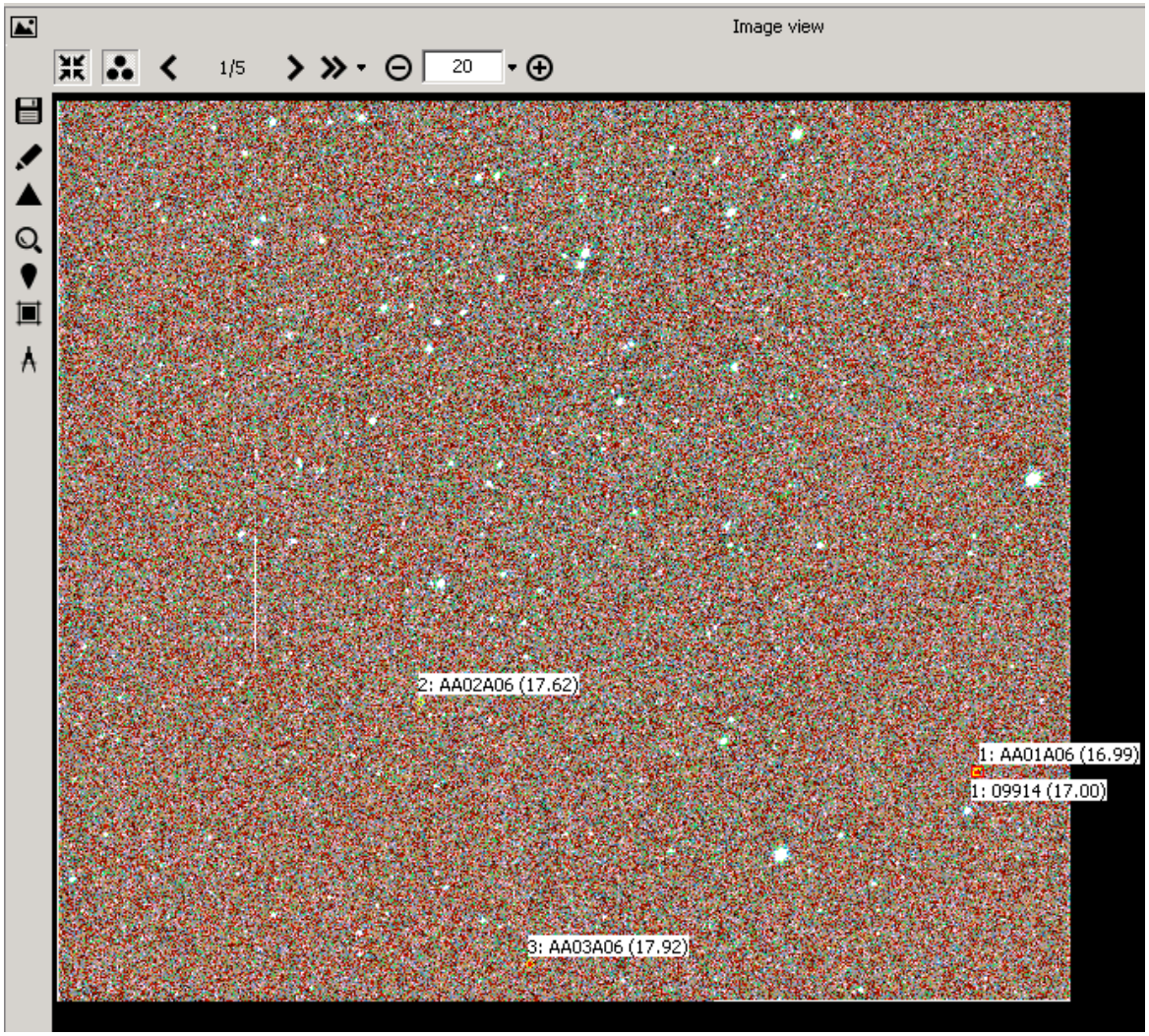


Рис. 8.6.5. Детектування рухомих об'єктів на ПЗЗ кадрі.

Для визначення можливості використання ПМЗ під час спостережень на телескопі КТ-50 було проведено моделювання процесу спостережень в режимі “Night” з вхідними даними у вигляді сформованих кадрів. Оскільки ПМЗ виконує переміщення вхідних файлів спостережень та видаляє службову інформацію з вхідної теки, безпосередньо використовувати ПМЗ на телескопі недоцільно. У випадку дублювання ПЗЗ зображень у різні теки можливо обробляти деякі серії спостережень в такий спосіб для оперативного отримання результатів. Оскільки у звичайному режимі всі спостереження КТ-50 обробляються після завершення спостережень. Також одним з негативних факторів є необхідність модернізації програм керування спостереженнями телескопа для забезпечення видачі ПЗЗ кадрів у послідовності, яка правильно оброблюється в ПМЗ CoLiTecAS. Це побажання є досить проблематичним, зважаючи на те, що телескоп працює в сталому режимі без суттєвих змін програмного забезпечення вже декілька років. У процесі моделювання було успішно оброблено одну відповідно підготовлену серію з трьох тестових. Можливо з розвитком ПМЗ варіант “Night” також можна буде використовувати в наших спостереженнях.

7. Перевірка якості отриманих результатів

Чи всі рухомі об’єкти були виявлені? Чи багато хибних об’єктів?

Оскільки відбувався пошук рухомих об'єктів, які не спостерігались цілеспрямовано, то оцінити їх кількість важко. З позитивного боку необхідно відзначити детектування слабких об'єктів, які зустрічаються не на всіх кадрах. З негативного боку - є частина хибних об'єктів, які співпадають з дефектами ПЗЗ матриці.

Чи вдалося сформувати необхідні звіти?

Так. Але хотілося б, щоб можна було вибрати такий формат звіту, в якому б відомі об'єкти якось помічались, наприклад у кінці рядка.

Методика перевірки точності отриманих оцінок координат або блиску.

Оцінка точності отриманих положень відомих астероїдів перевірялась обчисленням СКП залишкових різниць (O - C) з ефемеридою HORIZONS

лабораторії JPL. В цілому результати яскравих об'єктів (до 16 зоряної величини) відповідають тим результатам, які ми отримували з використанням інших програм. Є надія, що порівняння координат деяких слабких об'єктів (до 18 зоряної величини) після їх ототожнення з відомими об'єктами теж дасть прийнятний результат. Перевірка оцінок блиску не проводилась.

Висновки

ПМЗ CoLiTecAS встановлюється в стандартний спосіб без зауважень та помилок. Інтерфейс ПМЗ інтуїтивно зрозумілий, візуалізація процесу обробки зроблена добре, головні особливості ПМЗ у достатньо добре описані у наявній документації, хоча, деякі пункти налаштувань з редактора налаштувань без додаткового опису в документації можуть бути інтерпретовані користувачем неправильно.

Мінімальний час обробки серії на процесорі i5 3.2GHz: з 5 кадрів – 6 хв. 54 с, з 8 кадрів : 15 хв. 37 с.

Максимальний час обробки серії: з 5 кадрів – 8 хв. 07с, з 8 кадрів - 19 хв. 02 с.

Переваги:

– повна автоматизація процесу обробки спостережень;

– декілька режимів виділення рухомих об’єктів на кадрах;

– наявність достатньої кількості сучасних опорних зоряних каталогів;

– точність координат об’єктів на рівні інших ПМЗ;

– можливість детальної настройки параметрів обробки з урахуванням специфіки спостережень, телескопу та камери.

Зауваження та пропозиції

Деякі виявлені особливості, крім описаних раніше, які можна змінити на краще або додати функціональності:

Програма 3C v.1.8.10.1 та модулі, які вона запускає:

– немає можливості вибору декількох серій в теці за один сеанс, що є незначним недоліком, який проявляється переважно при необхідності обробки декількох серій із багатьох присутніх;

– при запуску декількох серій не можна задати для обробки вибрані ядра процесора, що дещо уповільнює роботу на процесорах з кількістю ядер меншою за кількість потоків;

– в деяких серіях некоректно обраховувався центр окремих кадрів за схиленням, можливо це залежить від кількості опорних зірок, але інформація про їх кількість та похибку редукції під час обробки або в LookSky не виводиться;

– при першому запуску обробки серій вона часто завершується з помилкою “CosmCLT: Error Opening File Results”, на екрані висвічується 60-70%, після повторного перезапуску обробка проходить;

– на окремих серіях помічено помилкове ототожнення гарячих стовпців ПЗЗ матриці як рухомих об'єктів (гарячі стовпці зазвичай мають фіксоване положення на ПЗЗ матриці від кадру до кадру, це можна враховувати або додатковим пунктом у налаштуваннях, або алгоритмом обробки);

– помічено вплив вибраного опорного каталогу на пошук рухомих об'єктів та їх детектування, можливо це вирішується деякими налаштуваннями в програмі ThresHoltds 1.8, але не всі варанти налаштування описані;

– також в налаштуваннях не було знайдено зміну варіантів врахування моментів спостережень, яких повинно бути як мінімум три: на початок, на кінець та на середину спостережень;

– бажано мати інформацію про астрометричну редукцію кадрів та серій, як мінімум у вигляді окремих лог файлів, а краще в самій програмі;

– після запуску пункту меню “Настройки” основне вікно програми не реагує на натискання миші та не переносить програму на передній план робочого столу.

Програма LookSky v.3.8.6.835:

– при роботі з робочим столом у віддаленому режимі (RDP, 24 біт палітра) FITS файл відкривається у кольоровому вигляді, хоча при підключені до робочого столу з вже відкритим файлом колір не спотворюється. Це ускладнює аналіз обробки засобами пакету.

– При першому використанні програми виникають питання щодо операцій з налаштуванням вікон LookSky.

8.7 Тестування ПМЗ з автоматизованого спостереження малих тіл сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадів CoLiTec з телескопом АЗТ-28 квантово-оптичної станції «Сажень-с» центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля НЦУВКЗ ДКА України

Робота виконувалась в рамках теми № 404-Кт наукового проекту «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» відповідно до розпорядження Президії НАН України від 25.07.2018 №411 «Про затвердження Переліку науково-технічних проектів НАН України, які будуть реалізовуватися у 2018 році».

Продукти, які тестувалися (CoLiTecAS, CoLiTecSat, або CoLiTecVS)

Проводилися випробування ПМЗ CoLiTecAS.

ПМЗ використовувалось для проведення спостереження астероїдів Головного поясу та астероїдів, **які** наближаються до Землі.

Вхідні дані (об’єкти дослідження)

Для спостережень були вибрані наступні об’єкти: 4 астероїди головного поясу (419, 456, 509, 704) та астероїд, **який** наближається до Землі, 2014 JO25.

Спостереження проводилися у режимі добового ведення.

Дані об’єкти були обрані в першу чергу через наявність кадрів з їх наявністю та даних по точності оцінки їхніх положень із зовнішніх джерел(сайти Центру малих планет, проектів AstDys-2 та NEODys-2).

Інструмент

30-см дзеркально-линзовий телескоп, фокусна відстань 30 см, без фільтрів, КМОП-камера ZWO ASI-174Mono Cool, 1920 x 1218 пкс без бінування, 5,86 мкм в пкс, робота у режимі добового ведення.

ЕОМ, на який було встановлено відповідні продукти

ОС: Win 7 Pro x64. CPU: Intel Core i7-6700, ОЗП: 8 GB DDR3, HDD: 4 TB, 7200 rpm, швидкість доступу до Інтернет: до 50 Mb/s.

Перевірка інсталяції продукту

№	Питання	Коментар
1	Встановлення було вдале	Так. ПМЗ було успішно встановлено у вказану папку.
2	Чи виникли якісь проблеми під час інсталяції	Ні
3	Чи були незрозумілі повідомлення під час інсталяції	Ні
4	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) в меню Пуск	Так – Центр управління, вьюер LookSky, редактор налаштувань
5	Чи з’явились ярлики (3шт – перерахувати) на робочому столі	Так – Центр управління, вьюер LookSky, редактор налаштувань
6	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску програми ЗС	Ні
7	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску LookSky	Ні
8	Чи виникли якісь проблеми при першому запуску Редактора	Ні

Перевірка виконання операцій обробки серій кадрів.

Всього було оброблено 18 серій кадрів:

8 серій по 4 кадри (по дві серії для кожного астероїда) для астероїдів Головного поясу з експозицією 2 с без бінування;

10 серій (9 по 10 кадрів, 1 – 79 кадрів) з експозицією 2 с без бінування для астероїда 2014 JO25;

Обробка здійснювалась у 4 потоки, у якості опорного каталогу був обраний онлайн-каталог UCAC5.

Результати обробки

Повністю оброблено: 15 серій.

Частково оброблено: 3 серії – 3 з 4 кадрів. Причина – похибки у заголовках кадрів.

Взагалі не оброблених серій не було.

Загальний час обробки: 50 хв. Головна причина – великий обсяг кадрів в одній з серій (79 кадрів).

Перевірка якості отриманих результатів

Усі астероїди були виявлені, вірно ототожнені службою MPCChecker та позначені у LookSky, а у деяких випадках зображення астероїдів на службових кадрах було навіть краще, ніж на початкових кадрах. Відсоток хибних виявлень був порівняно низький.

Зривів блінкування кадрів серії у LookSky не було.

Звіт по спостереженнях у форматі MPCReport був успішно сформований як для кожної серії так й для огляду за ніч в цілому.

Перевірка точності отриманих оцінок координат проводилася шляхом порівняння з оцінками координат, які були отримані на даних серіях за допомогою іншого ПМЗ обробки астрономічних кадрів – програми Astrometrica та аналізу помилок оцінок координат, які були отримані для даних астероїдів у зовнішніх службах Центру малих планет, сайтів проектів AstDys-2 та NEODys-2. Перевірка оцінок блиску не проводилась.

Отримані оцінки точності практично не відрізняються від оцінок, отриманих за допомогою іншого ПМЗ. СКВ оцінок координат астероїдів головного поясу склало біля 0,5 кутових секунд по кожній координаті з практично нульовим математичним очікуванням та без значних викидів. Для астероїда 2014 JO25 похибка склала -0,01±0,40 кутових секунди за прямим піднесенням та -0,34±0,31 кутових секунди за схиленням відповідно. Максимальна помилка склала біля 1,35 кутових секунди. Така різниця у математичному очікуванні викликана досить значною невизначеністю орбіти даного астероїда на момент спостережень. Астероїд рухався головним чином по схиленню, тому невизначеність орбіти призвела до зміщення оцінок саме по цій координаті. Таким чином. цей ефект не має відношення до ПМЗ.

Висновки

ПМЗ CoLiTecAS встановлюється достатньо просто без зауважень та помилок. Інтерфейс ПМЗ достатньо зрозумілий, візуалізація процесу обробки зроблена добре, головні неявні особливості вьюера LookSky у достатній мірі описані у наявній документації.

Мінімальний час обробки серії: з 4 кадрів – 2 хв. 55 с, з 10 кадрів: 6 хв. 30 с, частково обробленої – 1 хв. 15с.

Максимальний час обробки серії: з 4 кадрів – 5 хв. 40с, з 10 кадрів: 8 хв. 19 с, частково обробленої – 4 хв. 33с.

Переваги:

повна автоматизація процесу обробки спостережень, зокрема у режимі «онлайн», що значно зменшує час отримання кінцевого результату;

висока якість виявлення об’єктів, які рухаються, на серії кадрів з малою кількістю хибних виявлень;

можливість ототожнення відомих астероїдів через онлайн-сервіс MPC-Checker;

великий вибір опорних зоряних каталогів (онлайн та оффлайн), включаючи надсучасні;

точність оцінок координат об’єктів не гірша ніж у інших ПМЗ;

автоматичне формування звітів як за одну серію, так й за ніч.

Виявлені помилки.

Значних помилок під час тестування виявлено не було.

Зауваження та пропозиції

1. Чи є можливість організувати запис у звіт позначень малих тіл, які були ототожнені з вже відомими? Це значно спростить завдання формування фінальних звітів дослідниками, які не займаються оглядово-пошуковими спостереженнями, а спостерігають окремі вже відомі малі тіла.

2. Чи є можливість створення контролю внутрішньої точності отриманих вимірювань однієї серії з візуалізацією результату перед їх збереженням у

8.8 Результати досліджень показників точності виміювань CoLiTecSat за допомогою їх порівняння з високоточними ефермидами за обраними ШСЗ

Оцінка систематичної і випадкової помилки вимірювань. Для реалізації методів порівняння, описаних в попередніх розділах, використовувалася ПМЗ Kotlin Orbit Estimation Library (KOrbEstLib) [96] власної розробки.

Для оцінок величини випадкової і систематичної помилки вимірювань проводилося порівняння вимірювань координат ШСЗ з ефемеридами, які надавалися службами ILRS і GNSS. Точність ILRS для об'єктів, які розглядаються, краща за 10м, а GNSS краща за 1м.

У аналізі брали участь три станції спостереження, які надавали свої спостереження та результати вимірювання координат супутників. Географічні координати пунктів спостереження та устаткування описано в таблиці 8.8.1. і 8.8.2. Детальні відомості про телескоп MAYA OMT 800 можна знайти в роботі [40].

Таблиця 8.8.1. Координати місць состереження.

Назва телескопа	Назва обсерваторії	Широта (градуси)	Довгота (градуси)	Висота (м)
MAYA_OMT_800	АО ОНУ (с. Маяки)	46.396962	30.271277	18.9
UZHH_BRC250	УжНУ (с. Деренівка)	48.563551	22.453751	231.0
Verbizkyi	г. Тернопіль	49.566515	25.665245	354.4

Таблиця 8.8.2. Характеристики телескопів.

Назва телескопа	D(мм)	F(мм)	Роздільна здатність (кут.сек. на піксель)	Поле зору телескопа (куг. мін.)	Бінірування	Спосіб синхронізації затвору
MAYA_OMT_800	800	2130	1.16	59	1x1	GPS PPS
UZHH_BRC250	250	1280	1.46	100	2x2	GPS PPS
Verbizkyi	350	700	1.6	51	1x1	GPS

Обробка зображень виконувалася за допомогою програм CoLiTecSAT та Apex II [54]. Список ШСЗ для яких були отримані вимірювання координат подані у таблиці 8.8.3.

Таблиця 8.8.3. Статистика кількості серій вимірювань координат по кожному ШСЗ

Имя супутника	Norad ID	Висоти супутника (км)	Кількість серій зображення		
			загальне	CoLiTecSAT	Apex II
Galileo-102	37847	23220	1	1	1
Galileo-203	40544	23220	1	1	1
Galileo-205	40889	23220	1	1	0
Galileo-212	41860	23220	1	1	1
Etalon-1	19751	19100	1	1	1
Glonass-134	40315	19100	1	1	1
Beidou G5	38091	35800	4	4	3
IRNSS 1B	39635	35800	1	1	1
Lageos-1	08820	5900	3	3	0
Всього	–	–	14	14	9

У таблицях 8.8.4. - 8.8.12. показані статистичні оцінки характеристик нев'язок для даних супутників. Для цензурування грубих помилок використовувався поріг □=0.001.

Для порівняння оцінок стандартних відхилень (СКО) нев'язок між результатами вимірювань ПМЗ Apex II і CoLiTecSAT обчислювалося відношення

$$F = \sigma^2_{apex} \Big/ \sigma^2_{colitec}, \text{ если } \sigma^2_{apex} > \sigma^2_{colitec}$$
либо
$$F = \sigma^2_{colitec} \Big/ \sigma^2_{apex}, \text{ если } \sigma^2_{apex} < \sigma^2_{colitec} \qquad (8.8.1)$$

Далі обчислювалась ймовірність $P_{n-1,m-1}(F)$, того що значення однієї оцінки СКВ більше за іншу [20], у відповідності з розподілом Фішера, де n, m відповідна кількість вимірювань для кожного ПМЗ після процедури цензурування грубих помилок.

В таблицях показана величина $\alpha_F = 1 - P_{n-1,m-1}(F)$.

Оцінка систематичної і випадкової помилки вимірювань за спостереженнями з телескопом UZHH_BRC250. Кількість вимірювань для ШСЗ Galileo - 102 (37847), Galileo - 203 (40544), Galileo - 205 (40889), Galileo - 212 (41860), отриманих **з телескопом** UZHH _ BRC250, у кожній серії менша або дещо більша за 10 (таблиця. 8.8.4. - 8.8.7.). СКОВ одного вимірювання сильно варіюються від супутника до супутника, що викликано малою кількістю вимірювань. З одного боку, мала кількість вимірювань перешкоджає виявленню грубих помилок, а з другого боку, грубі помилки у свою чергу можуть призводити до істотно завищених оцінок СКВ.

Для геосинхронного ШСЗ IRNSS 1b (41860) на телескопі UZHH _ BRC250 було отримано більше 20 вимірювань, що вже дозволило виявити та відкинути ряд грубих помилок вимірювань (таблиця 8.8.8.). Серед вимірювань, які брали участь у порівнянні з ефемеридами, у CoLiTecSAT було виявлене 3 грубих помилки, а у Apex II одна. У цьому випадку Apex II

відкинув на 1 грубу помилку більше ніж CoLiTecSAT на попередньому етапі, до порівняння з ефемеридою.

У таблиці 8.8.9. показані оцінки СКВ для геостаціонарного ШСЗ Beidou G5 (38091). Програмою Apex II було виявлено 5 грубих помилок з 52 вимірювань, а CoLiTecSAT - 3 грубих помилки при тій самій кількості вимірювань.

У всіх розглянутих випадках, коли вимірювання проводилися за допомогою Apex II і CoLiTecSAT, оцінка величини α_Fне ставала меншою за 0,001. Таким чином, відмінності в оцінках СКВ по UZHH _ BRC250 не дозволяють зробити висновок про те, яке ПМЗ забезпечує меншу випадкову помилку вимірювань.

Оцінки СКВ одного вимірювання уздовж видимого шляху ШСЗ знаходяться у діапазоні від 0,33 до 1,8 кут. секунди, а у поперечному напрямку - від 0,1 до 1,9 кут. секунди. Мала кількість вимірювань і досить високий рівень СКВ одного вимірювання не дозволяють зробити однозначний висновок про наявність або відсутність систематичних зміщень між вимірюваннями і ефемеридею. Відносно високий рівень СКВ може бути обумовлений низьким рівнем роздільної здатності, оскільки усі зображення були отримані при бінуванні 2, що призводить до оцінки кутової роздільної здатності зображення 2.9" на піксел. Таким чином СКВ в перерахунку на пікселі знаходиться у діапазоні від 0,11 до 0,66, що порівняно за величиною з результатами для телескопів з великою кутовою роздільною здатністю.

Таблиця 8.8.4. Статистичні характеристики нев'язок для ШСЗ Galileo-102 (37847)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181105	UZHH_BRC250	ApexII	-1,3754	0,337	0,2174	0,181	-0,046	0,0112	5(5)
20181105	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-1,0544	0,997	0,0544	0,091	-0,035	0,0332	7(7)
		$□_F$		0,13		0,20			

Таблиця 8.8.5. Статистичні характеристики нев'язок для ШСЗ Galileo-203 (40544)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181024	UZHH_BRC250	ApexII	-1,2931	0,604	0,0214	0,319	-0,044	0,0205	28(28)
20181024	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-1,9855	1,819	-0,0806	0,416	-0,068	0,0628	18(18)
		$□_F$		0,0052		0,26			

Таблиця 8.8.6. Статистичні характеристики нев'язок для ШСЗ Galileo-205 (40889)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181105	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-2,2441	1,425	0,3870	0,246	-0,0742	0,0471	7(7)

Таблиця 8.8.7. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ Galileo-212 (41860)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181031	UZHH_BRC250	ApexII	-0,5615	0,876	-0,6303	0,776	-0,0198	0,0310	5(5)
20181031	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-2,6859	1,322	-2,3410	1,908	-0,0948	0,0467	10(10)
		$□_F$		0,34		0,17			

Таблиця 8.8.8. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ IRNSS 1B (41860)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181024	UZHH_BRC250	ApexII	-0,9466	1,166	-0,4721	0,499	-0,0640	0,0789	28(27)
20181024	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-0,9999	0,856	0,1795	0,302	-0,0676	0,0577	29(26)
		$□_F$		0,22		0,10			

Оцінка систематичної та випадкової помилки вимірювань за спостереженнями з телескопом Verbizkyi. Для телескопа Verbizkyi були проведені спостереження і виміряні координати для ШСЗ Beidou G5 (38091) (таблиця 8.8.9) і Lageos - 1 (08820) (таблиця 8.8.10). Заголовки fits файлів отримані з телескопом Verbizkyi сильно відрізняються від заголовків прийнятих при проведенні астрономічних спостережень. З цієї причини спостереження отримані з телескопом Verbizkyi не вийшло обробити за допомогою ПМЗ Apex II, вимірювання проводилися тільки за допомогою ПМЗ CoLiTecSAT. Для ШСЗ Beidou G5 (38091) була отримана одна серія вимірювань. Серія містила 87 вимірювань для часового проміжку 1 хв. 20 сек. Була виявлена одна груба помилка вимірювань. При порівнянні нев'язок і ефемериди упоперек видимого шляху виявлені систематичні відмінності рівні 1". Зміщення уздовж видимого шляху супутника, які значно відрізняються від нуля, не виявлено. СКВ одного вимірювання уздовж і поперек видимого приблизно однакові і склали 0,33" або 0.2 пікселя зображення.

У разі спостережень ШСЗ Lageos - 1 (08820) було отримано 3 серії вимірювань для одного проходження супутника над горизонтом. Для кожної серії використовувалася своя тривалість отримання експозиції. Кількість грубих помилок була не критична і це дозволило їх вдало виявити та відфільтрувати в автоматичному режимі. Із зростанням експозиції одного зображення до 500 мсек спостерігається істотне зростання рівня випадкової помилки одного вимірювання як у напрямі уздовж видимого шляху, так і упоперек його. Найменший рівень випадкової помилки одного вимірювання спостерігається при експозиції 300 мсек. Цим спостереженням відповідає найбільша висота супутника над горизонтом (Рис. 8.8.1.). Можливо, що першопричиною або додатковою причиною зниження рівня випадкової помилки вимірювань є висота супутника над горизонтом, що призводить до меншої турбуленції атмосфери і як наслідок — до покращення якості вимірювань координат зірок і супутника.

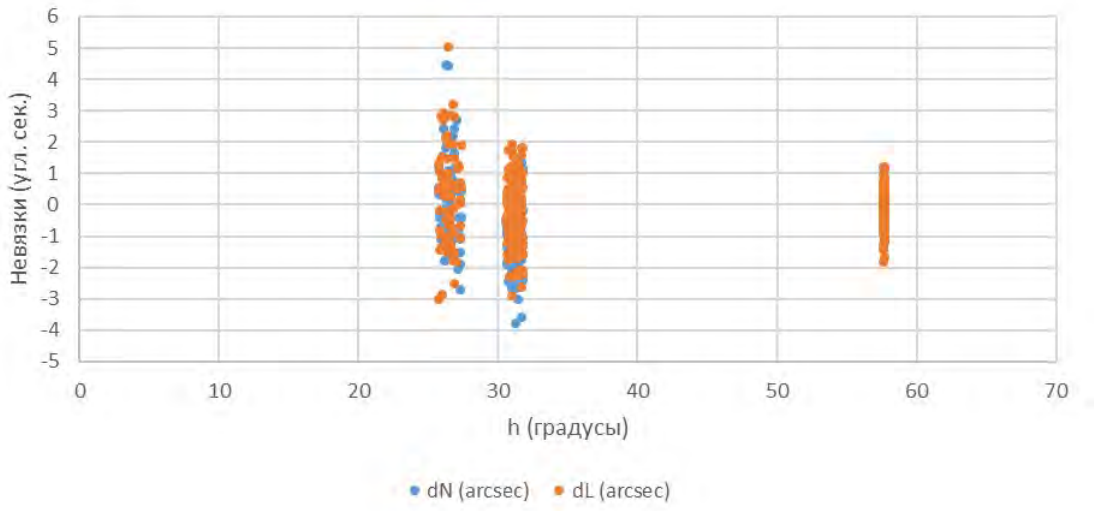


Рис. 8.8.1. Залежність величини нев'язок від висоти супутника Lageos-1 (08820) над горизонтом.

У вимірюваннях ШСЗ Lageos - 1 (08820) є присутнім значне зміщення середніх значень нев'язок відносно нуля. Причому величина цього зміщення змінюється уздовж видимого шляху. Причини зміщення, яке спостерігається, нині не відомі. Величина систематичного зміщення в термінах часу менша за 0.01 сек і також має тренд уздовж видимого шляху. Можливо, що причини систематичних зміщень уздовж видимого шляху в термінах кутів і часу мають загальні причини. В цілому усі три серії мають сумарне зміщення в термінах часу близько 0.001 сек. Враховуючи, наявність систематичного тренду уздовж видимого шляху не вдалося виявити відмінне від нуля систематичне зміщення за часом, обумовлене часом спрацьовування електронного затвора CMOS матриці, яка використовується з телескопом Verbizky .

Таблиця 8.8.9. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ Beidou G5 (38091)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181024	UZHH_BRC250	ApexII	-1,0497	1,077	0,1597	0,423	-0,0701	0,0719	28(23)
20181024	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-1,1068	1,289	0,3603	0,453	-0,0739	0,0861	28(25)
		$□_F$		0,34		0,44			
20181031	UZHH_BRC250	ApexII	-0,7084	0,694	0,0387	0,353	-0,0475	0,0466	20(20)
20181031	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-0,6486	1,396	-0,2090	0,793	-0,0435	0,0936	20(20)
		$□_F$		0,07		0,043			
20181105	UZHH_BRC250	ApexII	-0,8764	0,414	0,7130	0,193	-0,0586	0,0277	4(4)
20181105	UZHH_BRC250	CoLiTecSAT	-0,6565	0,368	0,5621	0,181	-0,0439	0,0246	4(4)
		$□_F$		0,44		0,48			
20181105	Verbizkyi	CoLiTecSAT	-0,0114	0,344	1,0214	0,323	-0,0008	0,0231	87(86)

Таблиця 8.8.10. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ Lageos-1 (08820)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Експозиція зображення (мсек)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
				середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20181105	200	Verbizkyi	CoLiTecSAT	-0,3076	0,975	-0,9966	0,923	-0,0022	0,0069	179(174)
20181105	300	Verbizkyi	CoLiTecSAT	-0,0948	0,587	-0,1253	0,444	-0,0005	0,0032	155(154)
20181105	500	Verbizkyi	CoLiTecSAT	0,2917	1,540	0,1292	1,431	0,0022	0,0116	81(70)

У доступній літературі важко знайти такий самий детальний аналіз помилок вимірювань положення ШСЗ за оптичними спостереженнями для низькоорбітальних об'єктів. У роботі [95] так само аналізуються вимірювання низькоорбітального ШСЗ Ajisai (16908), отримані в Одесі на КТ- 50. Для цих вимірювань величина стандартного відхилення одного вимірювання уздовж видимого шляху склала 1.3", а упоперек - 1.0". Поле зору КТ - 50 складає 10 кутових мінут, а кутова роздільна здатність 0.8". Мале поле зору КТ- 50 зазвичай не дозволяє повністю відновити 6 постійних зображень. Отримані оцінки величина стандартного відхилення одного вимірювання для ШСЗ Lageos - 1 помітно менші ніж у випадку ШСЗ Ajisai, що обумовлено великим полем зору та можливістю визначити більшу кількість постійних зображення. У той самий час, систематичне зміщення вимірювань ШСЗ Ajisai майже в усіх випадках було менше за 0.5".

Оцінка систематичної та випадкової помилки вимірювань за спостереженнями з телескопом MAYA_OMT_800.

За спостереженнями, отриманими з телескопом MAYA OMT 800, були проведені порівняння виміряних координат з ефемеридами для ШСЗ Glonass - 134 (40315) і ШСЗ Etalon - 1 (19751). Для кожного ШСЗ було отримано по одній серії вимірювань. Кожна серія зображень була оброблена за допомогою ПМЗ ApexII і CoLiTecSAT. В результаті відбракування вимірювань на етапі обробки зображень і цензурування грубих помилок вимірювань більша кількість відбракованих вимірювань була у ПМЗ CoLiTecSAT в обох серіях. При порівнянні вимірювань і ефемерид моменти часу вимірювань були скореговані на величину 0,030 сек рівну часу спрацьовування затвора ПЗЗ приймача. На Рис. 8.8.2. та 8.8.3. показані нев'язки вздовж і поперек видимого шляху ШСЗ Glonass - 134 (40315) за результатами вимірювань ApexII та CoLiTecSAT відповідно. Видно, що нев'язки уздовж шляху мають невеликий та похилий тренд, що повинно завищувати уцінку СКВ уздовж цього напряму (Таблиця 8.8.11.). Нев'язки упоперек видимого шляху мають невелике систематичне зміщення.

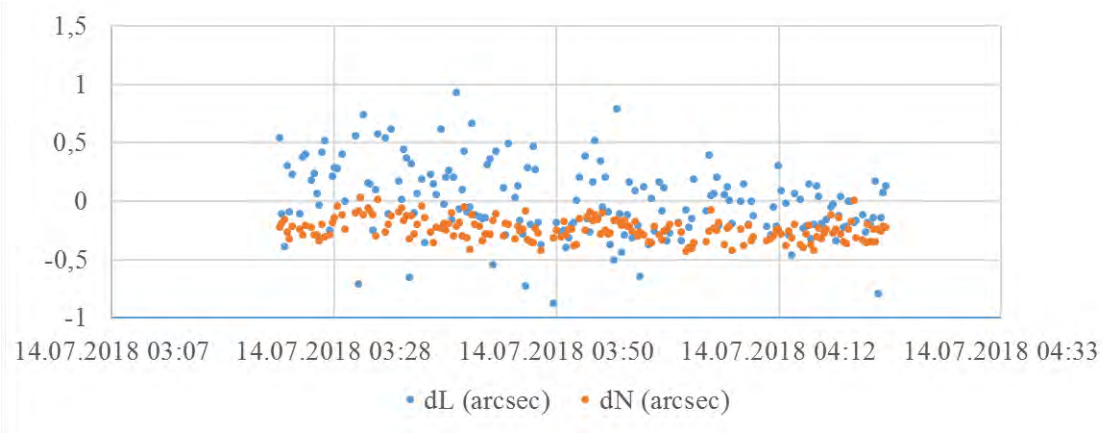


Рис. 8.8.2. Залежність величини нев'язок спостереження ШСЗ Glonass-134 (40315) від часу для Apex II.

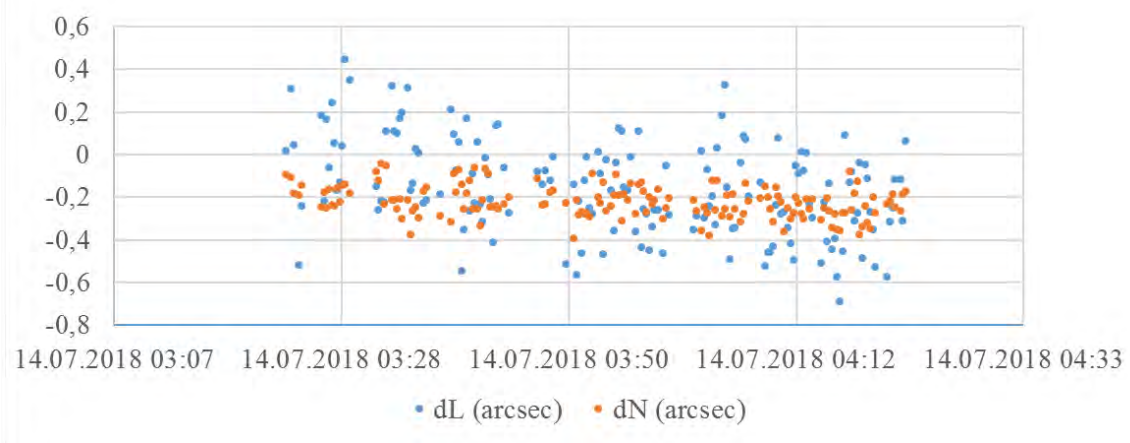


Рис. 8.8.3. Залежність величини нев'язок спостереження ШСЗ Glonass-134 (40315) від часу для CoLiTecSAT.

Отримані статистичні оцінки нев'язок (Таблиця 8.8.11.) підтверджують наявність значимого зміщення відносно нуля для нев'язок упоперек видимого шляху і наявність систематичної відмінності між оцінками нев'язок уздовж видимого шляху на величину 0,16" між оцінками Apex II і CoLiTecSAT.

На Рис. 8.8.4. і 8.8.5. показана поведінка нев'язок вздовж і поперек видимого шляху для одного проходження ШСЗ Etalon - 1 (19751). Видно, що систематичні відмінності в оцінках уздовж видимого шляху супутника однаково проявляються як при вимірюваннях координат за допомогою CoLiTecSAT, так і Apex II. Значна амплітуда тренду істотно збільшує СКВ

уздовж видимого шляху (Таблиця 8.8.12.). Як і у випадку з ШСЗ Glonass - 134 (40315), присутнє систематичне зміщення між оцінками нев'язок уздовж видимого шляху, виміряних за допомогою CoLiTecSAT та Apex II. Видимий тренд в нев'язках упоперек видимого шляху відсутній, а оцінка зміщення несуттєво відрізняється від 0 в обох випадках.

Оцінки величини α_F, як і у випадку спостережень з телескопом UZHH _ BRC250, перевищують значення 0,001 в усіх випадках. Таким чином, і для телескопа MAYA OMT 800 оцінки СКВ для одного вимірювання в результаті вимірювань за допомогою CoLiTecSAT і Apex II відрізняються несуттєво. СКВ в перерахунку на піксел змінюються від 0,08 до 0,26 пікселя (СКВ уздовж видимого шляху для ШСЗ Etalon - 1 не враховувалися з причини значного внеску в цю оцінку амплітуди систематичного тренду), що відповідає кращому результату з усіх розглянутих в цьому розділі вимірювань.

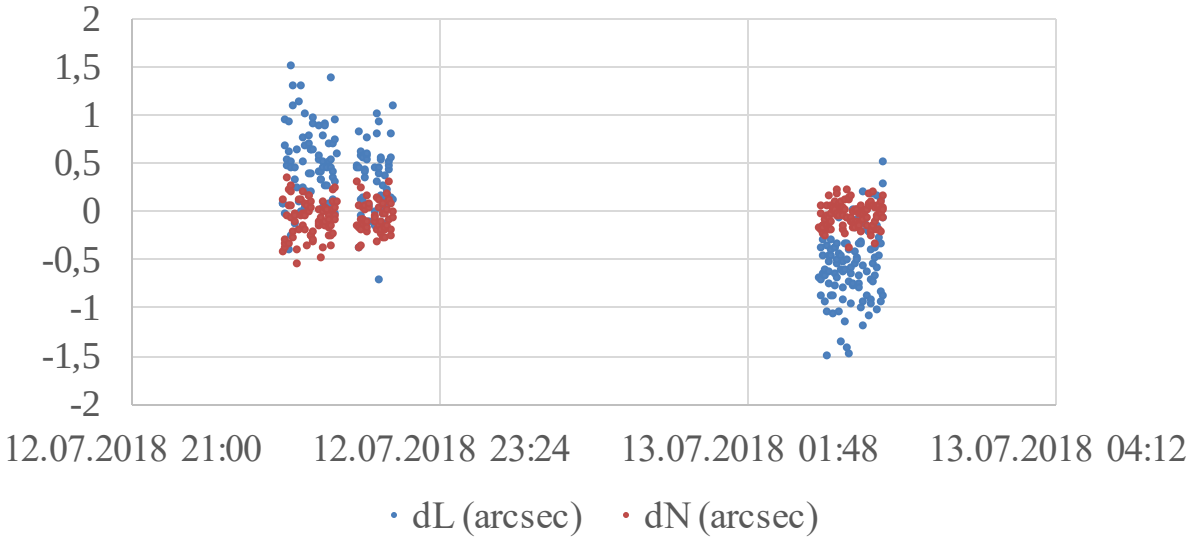


Рис. 8.8.4. Залежність величини нев'язок спостереження ШСЗ Etalon - 1 (19751) від часу для CoLiTecSAT.

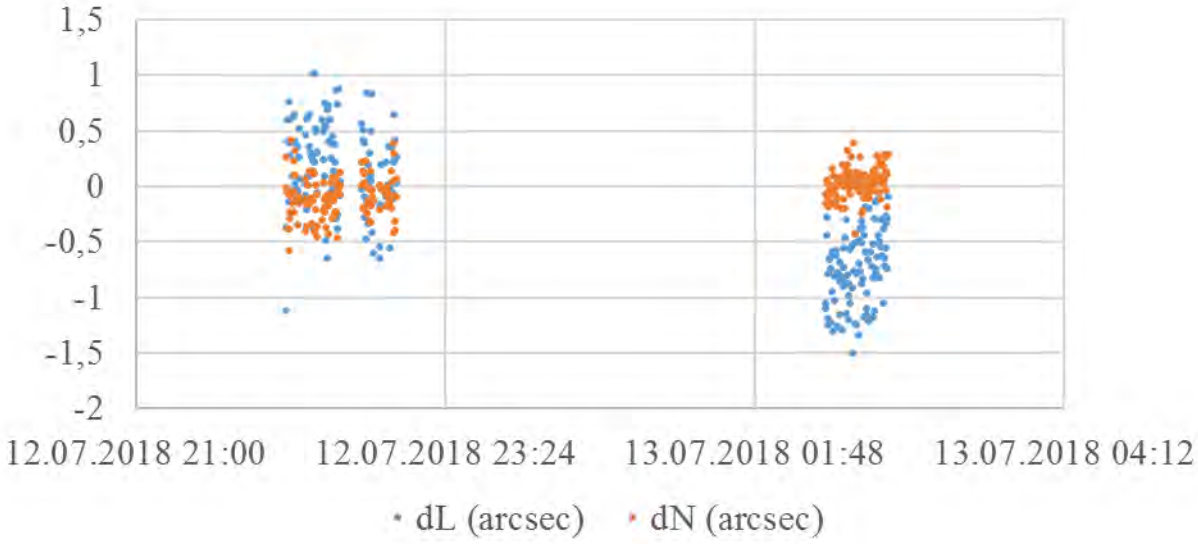


Рис. 8.8.5. Залежність величини нев'язок спостереження ШСЗ Etalon-1 (19751) від часу для CoLiTecSAT.

Таблиця 8.8.11. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ Glonass-134 (40315)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20180714	MAYA_OMT_800	ApexII	-0,0027	0,305	-0,2391	0,094	-0,0001	0,0078	187(185)
20180714	MAYA_OMT_800	CoLiTecSAT	-0,1566	0,225	-0,2204	0,074	-0,0040	0,0057	178(159)
		$\square_F$		0,024		0,061			

Таблиця 8.8.12. Статистичні характеристики нев’язок для ШСЗ Etalon-1 (19751)

Маркер проходження (ГГГГММДД)	Телескоп	Програма обробки	*dL* (arcsec)		*dN* (arcsec)		*dT* (sec)		Кількість вимірювань Всього(□>0.001)
			середнє	□	середнє	□	середнє	□	
20180712	MAYA_OMT_800	ApexII	-0,0057	0,621	-0,0476	0,157	0,0001	0,0174	245(238)
20180712	MAYA_OMT_800	CoLiTecSAT	-0,2370	0,586	-0,0386	0,176	-0,0064	0,0163	230(226)
		$\square_F$		0,37		0,20			

Висновки

1. Випадкові помилки одного вимірювання для ПМЗ CoLiTecSAT та Apex II за наданим матеріалом розрізняються несуттєво.

2. Точність одного вимірювання координат ШСЗ з використанням CoLiTecSAT та Apex II постійно зростає із збільшенням роздільної здатності телескопа до 1,16" на піксель включно.

3. У результатах вимірювань MAYA OMT 800 виявлені систематичні тренди нев'язок, які ймовірно непов'язані з процесом вимірювання координат засобами ПМЗ CoLiTecSAT та Apex II. У вимірюваннях Verbizkyi виявлені систематичні відхилення нев'язок упоперек видимого шляху близько 1". Причини систематичних трендів в нев'язках вимагають подальшого вивчення та подальшої редукції.

4. Між вимірюваннями координат ПМЗ CoLiTecSAT і Apex II за даними MAYA OMT 800 спостерігається систематичний зсув уздовж видимого шляху супутника на рівні 0,1-0,2". Величина цього зсуву вимагає подальшої перевірки і уточнення.

5. Використання програми обробки зображень CoLiTecSAT разом з телескопом Verbizkyi за певних умов спостережень потенційно може забезпечити найкращий рівень випадкової помилки одного вимірювання для низькоорбітальних об'єктів серед усіх телескопів, які надавали свої спостереження в мережу УМОС.

6. Формат заголовка, який використовується при формуванні зображень телескопом Verbizkyi вимагає адаптації до стандартів запису астрономічних зображень для можливості використання їх спільно з сторонніми ПМЗ, наприклад ПМЗ Apex II.

8.9 Типові приклади виявлення зображень об’єктів, змазаних їх власним рухом

Розроблений метод виявлення зображень об'єктів, змазаних власним рухом, був реалізований у рамках програмного комплексу автоматизованого виявлення астероїдів і комет CoLiTec (процедура «FASTCLT»). Дослідження об'єктів з протяжними зображеннями проходили в обсерваторіях ISON-Kislovodsk і ISON-NM. Нижче наведені типові приклади зображень, змазаних власним рухом об'єктів, виявлених на кадрах вказаних обсерваторій.

У таблицях представлені наступні характеристики вимірювань об’єкта: в колонках 2-3 представлені координати положення об'єкта, що досліджується $x_{\tau t}(\Theta_{\tau noise}^{sub})$; значення оцінки ексцентриситету $\hat{\varepsilon}$ (колонка 4); кут ω_t між напрямком руху об’єкта і віссю абсцис (колонка 5); довжина d зображення об’єкта (колонка 6); ширина і радіус зображення об’єкта (колонки 7-8), а також оцінка параметра ВСШ (колонка 9).

Також для кожного зображення об'єкту параметри рухи представлені в таблиці. В якості параметрів руху об’єкта використовуються: кут траєкторії руху об'єкту; швидкість видимого руху протяжного об'єкту на серії кадрів, мінімально допустима швидкість об'єкту, що визначається по довжині його зображення (швидкість на кадрах):

$$V_{ob_\min} = (d - l_{ob} - 1)/(\Delta_\tau \times \Delta_{fr}), \qquad (8.9.1)$$

де Δ_τ – час експозиції;

Δ_{fr} – час між кадрами;

l_{ob} – ширина зображення об’єкта.

Швидкість видимого руху протяжного об'єкту на серії кадрів (швидкість на серії кадрів) визначається виразом:

$$\hat{V}_{xy} = \sqrt{\hat{V}_x^2 + \hat{V}_y^2}\ . \qquad (8.9.2).$$

В якості ще одного параметра зображення об'єкту використовується залишкова дисперсія по параметрам його руху. Оцінкою дисперсії (залишковою дисперсією) по координаті x с невідомими координатами початкового положення x_0, y_0 і швидкостями видимого руху по кожній координаті V_x, V_y вважається оцінка дисперсії $\sigma^2_{\hat{\theta}x}$ в невиродженої лінійної регресійної моделі [13, 31]:

$$\sigma^2_{\hat{\theta}x} = \sum_{t=1}^{N_{mea}} (x_t - \hat{x}_t)^2 / (N_{mea} - 2), \qquad (8.9.3)$$

де $\hat{x}_t = \hat{x}_0 + \hat{V}_x(\tau_t - \tau_0)$ (8.9.4)

– згладжена оцінка координати x в СК базового ПЗЗ-кадра на t -у кадрі.

N_{mea} ($N_{mea} \le N_{fr}$) – кількість вимірювань положення об'єкту на N_{fr} кадрах.

Аналогічно, для координати y:

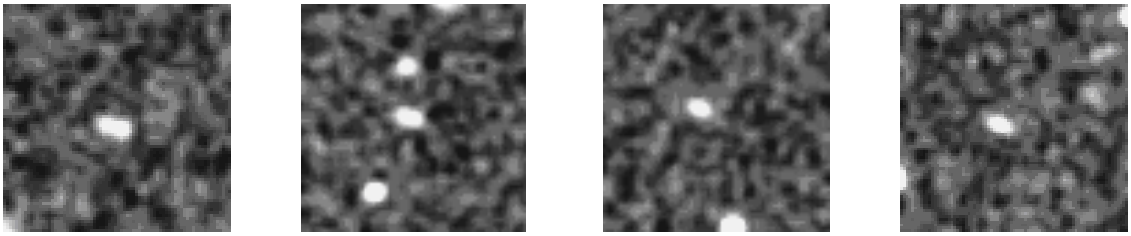
$$\sigma^2_{\hat{\theta}y} = \sum_{t=1}^{N_{mea}} (y_t - \hat{y}_t)^2 / (N_{mea} - 2), \qquad (8.9.5)$$

де $\hat{y}_t = \hat{y}_0 + \hat{V}_y(\tau_t - \tau_0)$. (8.9.6)

Сумарна залишкова дисперсія $\sigma^2_{\hat{\theta}}$ оцінки координат протяжного об’єкта, з невідомими координатами початкового положення x_0, y_0 і швидкостями по кожній координаті V_x, V_y складає:

$$\sigma^2_{\hat{\theta}} = \sigma^2_{\hat{\theta}x} + \sigma^2_{\hat{\theta}y}. \qquad (8.9.7)$$

Об’єкт 1. Обсерваторія D00, серія кадрів **Fast_18.6_4.0_02**



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.1 –Зображення обєкта Fast_18.6_4.0_02 на кадрах

Таблиця 8.9.1 – Характеристики вимірювань об’єкта (Fast_18.6_4.0_02) обсерваторії D00, час експозиції кадра Δ_τ = 100 сек

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта	$\hat{q}$
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
середнє				160.5	7.35			
СКВ				4.7	0.4			

Таблиця 8.9.2 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів Fast_18.6_4.0_02) обсерваторії D00

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах V_{ob_min} [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	153.4	0.00\0.03	30.1	31

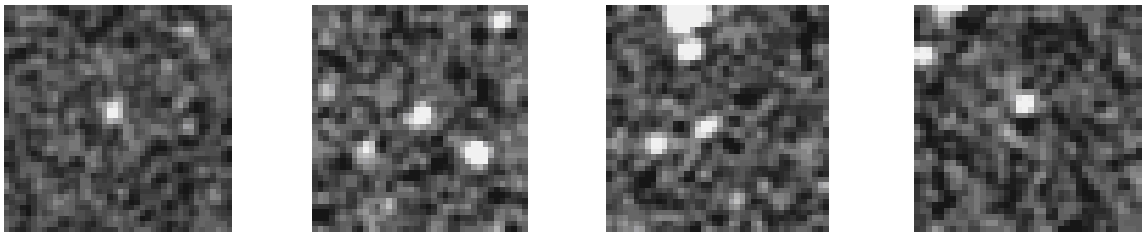
Об’єкт 2. Обсерваторія D00, серія кадрів Fast_ 18.7_4.0_03

Таблиця 8.9.3 – Характеристики вимірювань об’єкта Fast_ 18.7_4.0_03 обсерваторії D00

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	width	radius	$\hat{q}$
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

Таблиця 8.9.3 – Характеристики вимірювань об’єкта Fast_ 18.7_4.0_03 обсерваторії D00 (продовження)

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	width	radius	$\hat{q}$
Сред.				63.5	6.4			
СКВ				46.6	0.1			



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.2 –Зображення об’єкта Fast_ 18.7_4.0_03 на кадрах

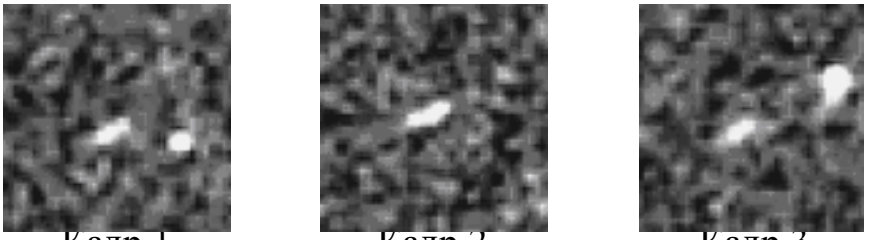
Таблиця 8.9.4 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (Fast_18.6_4.0_02) обсерваторії D00

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	41.4	100	-	31.4	30.5

Об’єкт 3. Обсерваторія D00, серія кадрів Fast_18.7_8.5_04

Таблицая 8.9.5 – Характеристики вимірювань об’єкта (Fast_ 18.7_8.5_04) обсерваторії D00

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення обєкта	радіус зображення обєкта	$\hat{q}$
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			
СКВ				2.0	0.3			



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3

Рисунок 8.9.3 –Зображення об’єкта (Fast_ 18.7_8.5_04) на кадрах

Таблица 8.9.6 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (Fast_18.7_8.5_04) обсерваторії D00

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	21.5	100	0.01\0.00	62	56.3

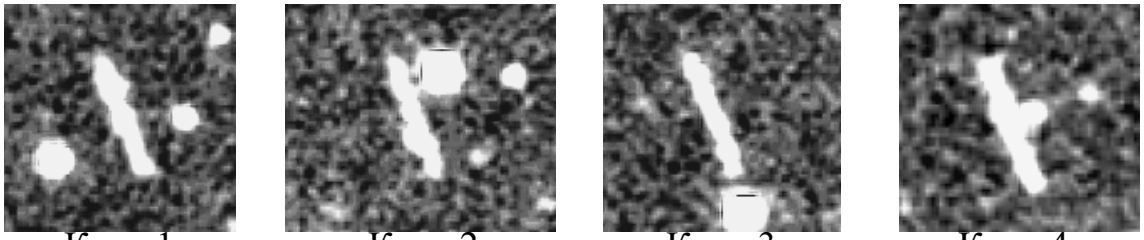
Об’єкт 4. Обсерваторія H15_3056, серія кадрів Fast_12

Таблиця 8.9.7 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_12) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта
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
середнє				115.625	34.8		
СКВ				2.0	1.4		

Таблиця 8.9.8 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_3056, серія кадрів Fast_12) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пикс.\кадр]
значення	110.5	240	1.95\0.27	97	102



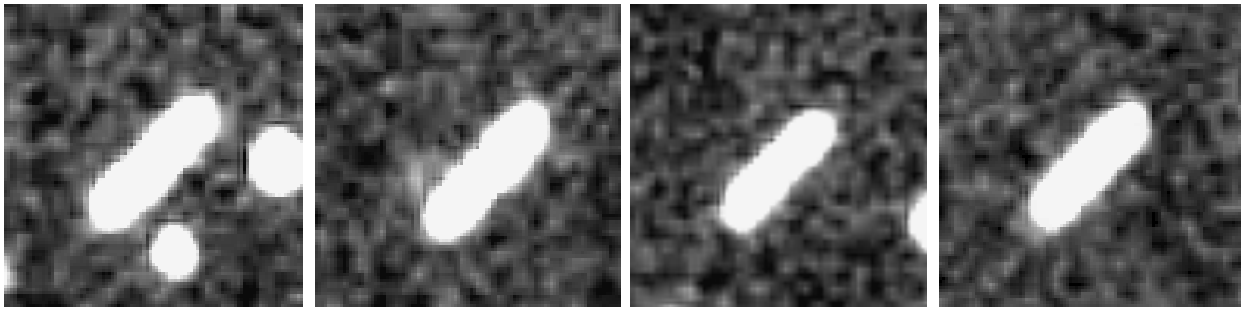
Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.4 –Зображення об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_12) на кадрах

Об’єкт 5. Обсерваторія H15_3056, серія кадрів Fast_8.6

Таблиця 8.9.9 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_8.6) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта
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
середнє				47.0	25.95		
СКВ				0.3	0.7		



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.5 –Зображення об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_8.6) на кадрах

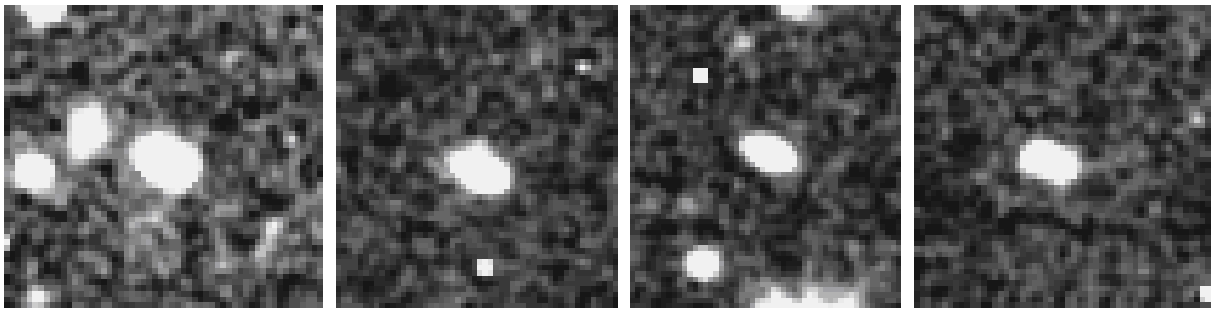
Таблиця 8.9.10 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_3056, серія кадрів Fast_8.6) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	46	240	0.07\0.12	115.35	109

Об’єкт 6. Обсерваторія H15_3056, серія кадрів Fast_3.4

Таблиця 8.9.11 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_3.4) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта
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
середнє				155.7	16.0		
СКВ				4.0	0.9		



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.6 –Зображення об’єкта (H15_3056, серія кадрів Fast_3.4) на кадрах

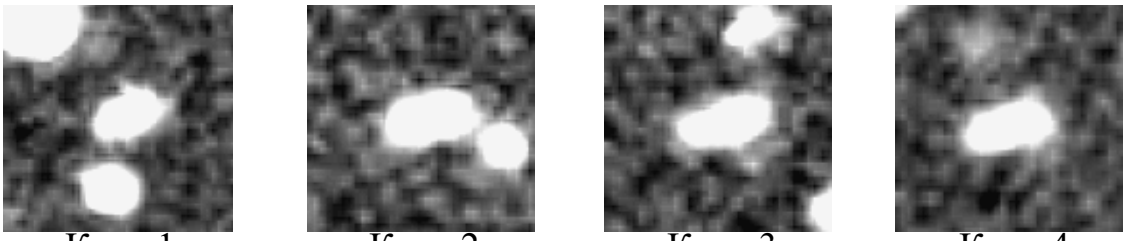
Таблиця 8.9.12 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_3056, серія кадрів Fast_3.4) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	159.5	240	0.00\0.05	67.7	58.5

Об’єкт 7. Обсерваторія H15_4096, серія кадрів Zone006

Таблиця 8.9.13 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone006) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта	$\hat{q}$
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
середнє				14.7	17.125			
СКВ				6.5	0.8			



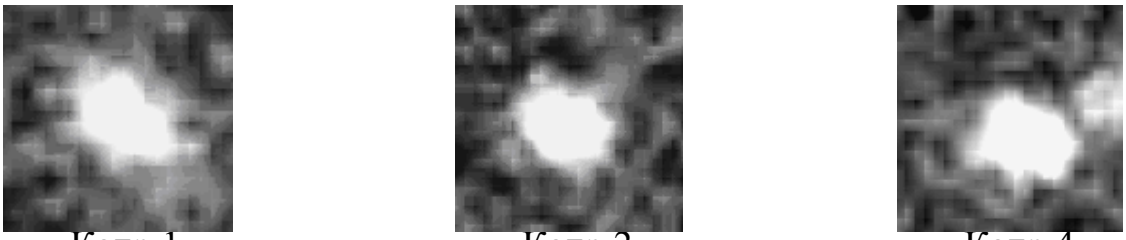
Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.7 –Зображення об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone006) на кадрах

Таблицая 8.9.14 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_4096, серія кадрів Zone006) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	19.8	150	3.37\0.87	57.0	64

Об’єкт 8. Обсерваторія H15_4096, серія кадрів Zone009



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 4

Рисунок 8.9.8 –Зображення об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone009) на кадрах

Таблиця 8.9.15 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone009) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта	$\hat{q}$
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	Нема вимірювання, на зорі, рис.1					
4	1621	3724	0.64	170.6	14.1	6.6	6.5	674
середнє				152.5	14.7			
СКВ				12.6	0.7			

Таблиця 8.9.16 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_4096, серія кадрів Zone009) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах V_{ob_min} [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	160.1	150	0.00\0.20	38.4	42

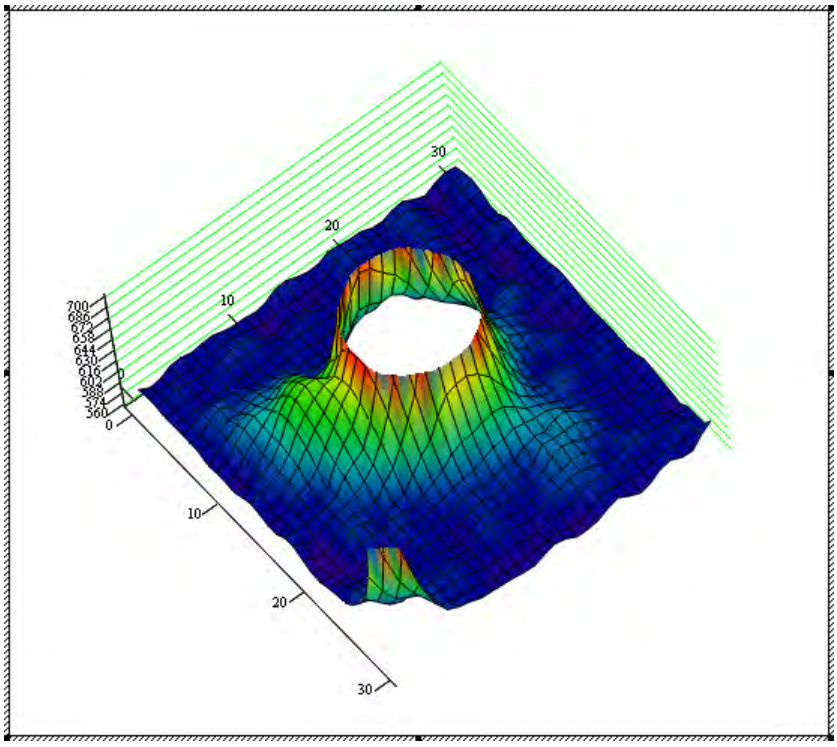
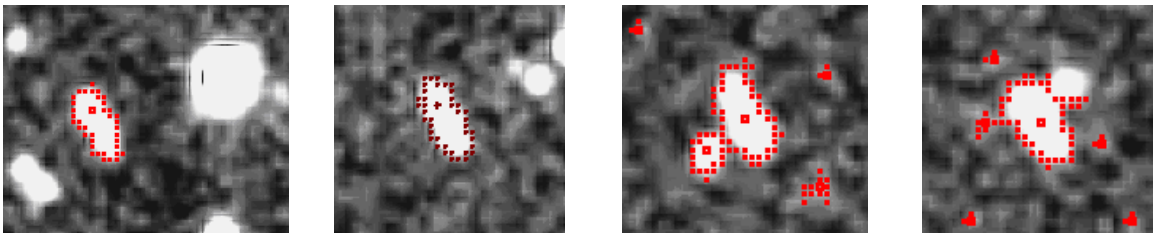


Рисунок 8.9.9 – Візуалізація зображення об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone009) поряд із зорею

Об’єкт 9. Обсерваторія H15_4096, серія кадрів Zone016

Таблиця 8.9.17 – Характеристики вимірювань об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone016) обсерваторії H15

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта	$\hat{q}$
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
Серед.				116.82	14.85			
СКВ				3.6	0.7			



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.10 –Зображення об’єкта (H15_4096, серія кадрів Zone016) на кадрах

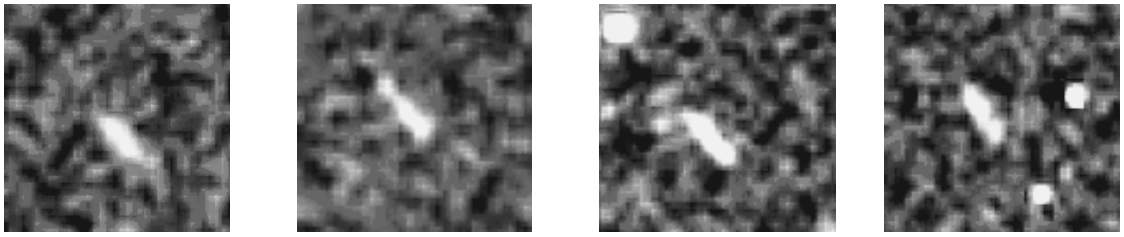
Таблиця 8.9.18 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) (H15_4096, серія кадрів Zone016) обсерваторії H15

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах V_{ob_min} [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	117.1	150	0.02\0.01	54.4	57

Об’єкт 10. Обсерваторія «Н. Мишевський» (L33), серія кадрів 4

Таблиця 8.9.19 – Характеристики вимірювань об’єкта («Н.Мишевський», серія кадрів 4) обсерваторії L33

Кадр	X	Y	$\hat{\varepsilon}$	ω_t	d	ширина зображення об’єкта	радіус зображення об’єкта	$\hat{q}$
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
Серед.				137.7	11.5			
СКВ				3.1	1.2			



Кадр 1 Кадр 2 Кадр 3 Кадр 4

Рисунок 8.9.11 –Зображення об’єкта («Н.Мишевський», серія кадрів 4) на кадрах

Таблиця 8.9.20 – Параметри руху об’єкта (серії кадрів) («Н. Мишевський», серія кадрів 4) обсерваторії L33

Параметр	Кут траєкторії [гр.]	Δ_τ [сек.]	Зал. Дисперсії	Швидкість на кадрах $V_{ob_\min}$ [пікс.\кадр]	Швидкість на серії [пікс.\кадр]
значення	139	180	0.11\0.10	67	64

8.10 Типові приклади кривих блиску зір, які досліджувались

Тестування ПМЗ CoLiTecVS автоматичної побудови кривих блиску проводилось в 5 обсерваторіях України та світу. Точність визначалась на за СКВ вимірювання зір з постійним блиском (таких, які не визначені зорями зі змінним блиском). Результати дослідження точності наведені в таблиці 8.10.1.

Таблиця № 8.10.1. СКВ оцінки блиску зір постійного блиску

№ серії	обсерваторія	Розмір апертури телескопа	№ постійної зорі	СКВ оцінки блиску
1	Словаччина	700	1	0.04793
1			2	0.02501
2	Словаччина	1000	1	0.00285
2			2	0.00274
3	Казахстан	700	1	0.01370
3			2	0.02320

Таблиця № 8.10.1 – СКВ оцінки блиску зір постійного блиску (продовження)

4	ЛКД УжНУ	400	1	0.01120
4			2	0.01520
4			3	0.01603
5	ЛКД УжНУ	400	1	0.01447
5			2	0.01405
5			3	0.01067
6	ОАО	800	1	0.00578
6			2	0.0040

6			3	0.00940
7	ОАО	800	1	0.00299
7			2	0.00320
8	ХАО	700	1	0.01223
8			2	0.01522
8			3	0.03376
9	ХАО	700	1	0.01092
9			2	0.02697
9			3	0.00919

З таблиці 8.10.1. видно, що СКВ кривих блиску зір, які не визнані зорями зі змінним блиском достатньо пристойне. Його значення залежить від телескопа, камери, розміру апертури телескопа та абсолютного значення зір, які досліджувались.

Було з’ясовано, що для зменшення динамічного діапазону яскравості фону зображень використовуються службові калібрувальні кадри, а після них можуть використовуватися математичні вирівнювачі яскравості з класу медіанний або частотних. Використані методи вирівнювання фону показали хороші результати як при недоліках оптичного інструменту так і при наявності паразитних засвіток.

Наявність автоматичної фотометрії дозволяє досліднику змінних зір фотометричним методом проводити більш широкі дослідження. Це може призвести до нових відкриттів змінних зір та нових узагальнень, яких так потребує зазначена галузь астрономії, яка притаманна Українським астрономічним обсерваторіям.

ПМЗ CoLiTecVS виконує обробку кадрів протягом спостереження; підтримує багатопотокові багатопроцесорні системи та роботу у локальній мережі. Однак, не дивлячись на це, час обрахунку ПМЗ CoLiTecVS кривих блиску достатньо великий. У цьому випадку на Вігорлацькій обсерваторії

бюджету часу вистачає для онлайн побудови кривих блиску, які будуються по кадрах з 5 телескопів, які працюють одночасно.

Окремі криві блиску наведені нижче.

Вігорлацька обсерваторія (Словаччина)-серія 1 (108 кадрів, телескоп C11, апертура 700мм, фокусна відстань 3060мм, розмір кадру 768x512, розмір пікселя 0.018мм, кутовий розмір пікселя 1.21’’/pix, фільтр I).

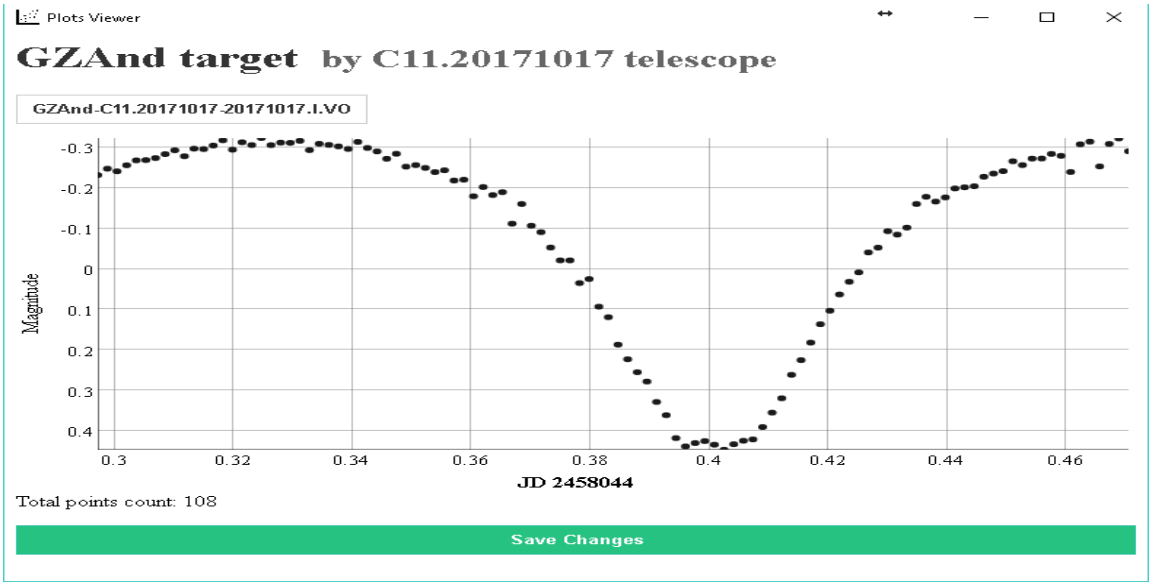


Рис. 8.10.1. Змінна зоря «GZ And»

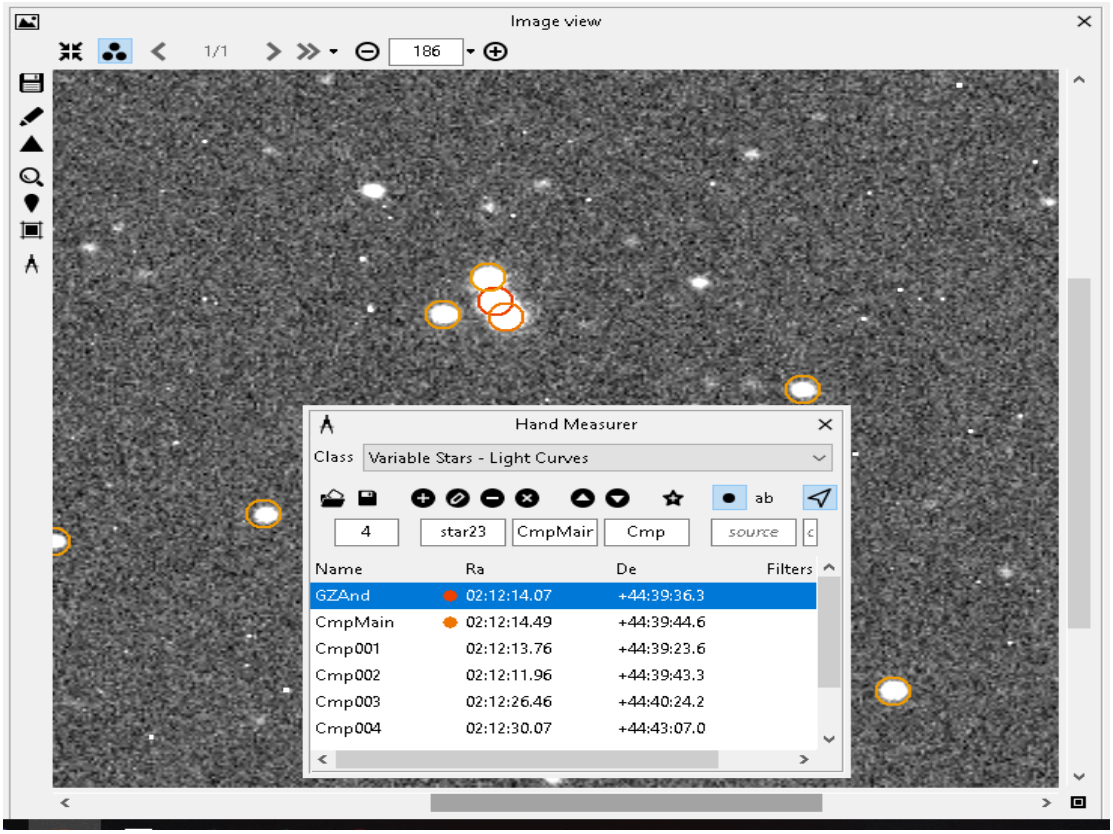


Рис. 8.10.2. Список зір порівняння

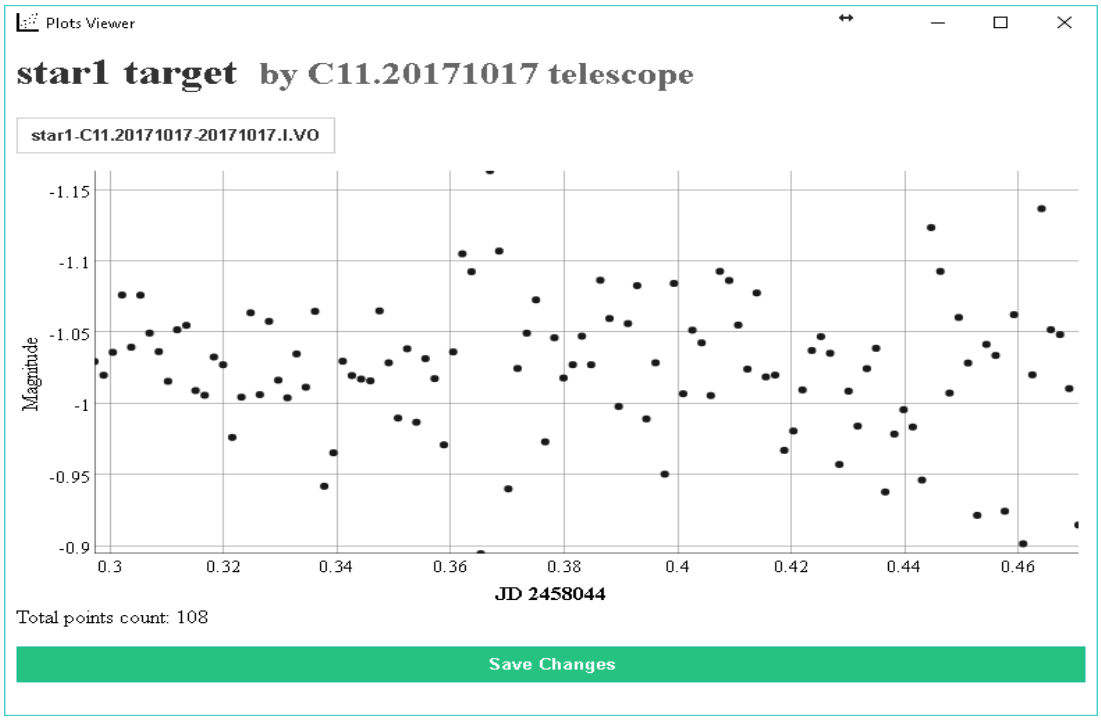


Рис. 8.10.3. Постійна зоря №1 (середнє значення оцінки – 1,02, СКВ оцінки 0,04793)

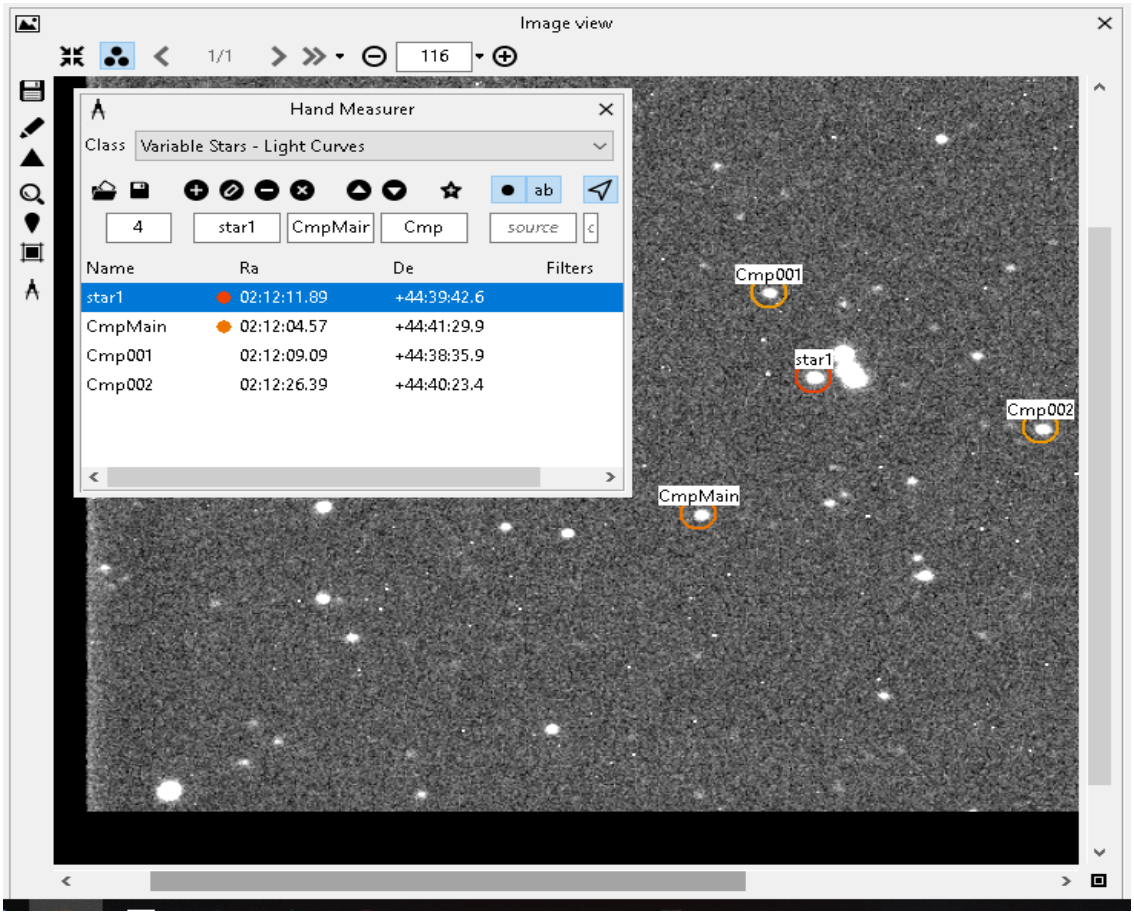


Рис. 8.10.4. Список зір порівняння

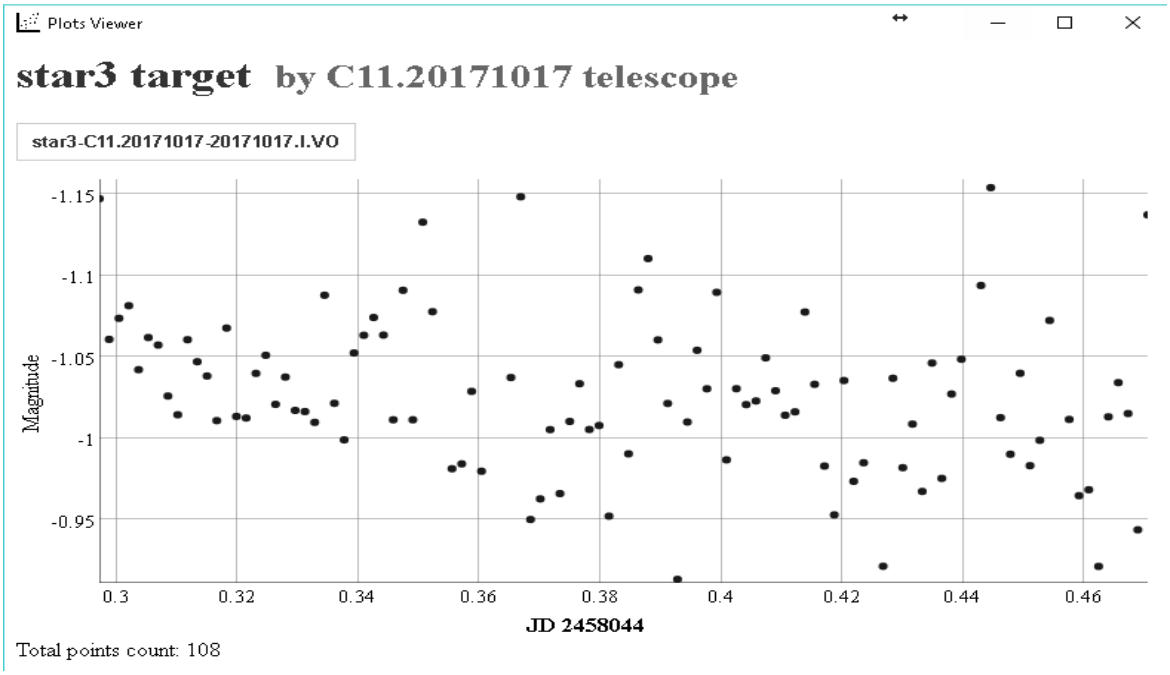


Рис. 8.10.5. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки -1.03, СКВ оцінки 0.02501)

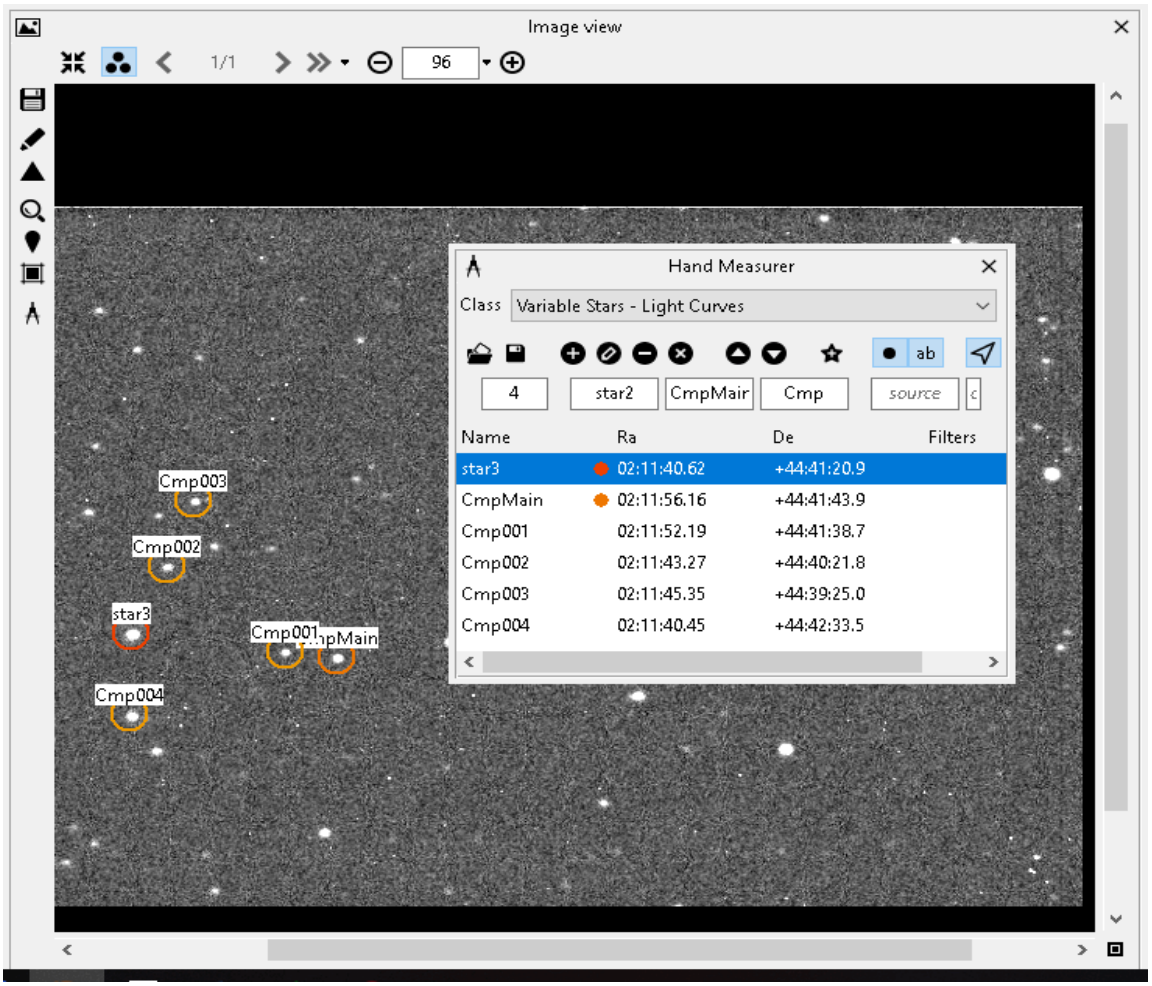


Рис. 8.10.6. Список зір порівняння

Вігорлацька обсерваторія (Словаччина)-серія 2 (141 кадр, телескоп VNT, апертура 1000мм, фокусна відстань 9000мм, розмір кадра 512x512, розмір пікселя 0.048мм, кутовий розмір пікселя 1.11’’/pix, фільтр I).

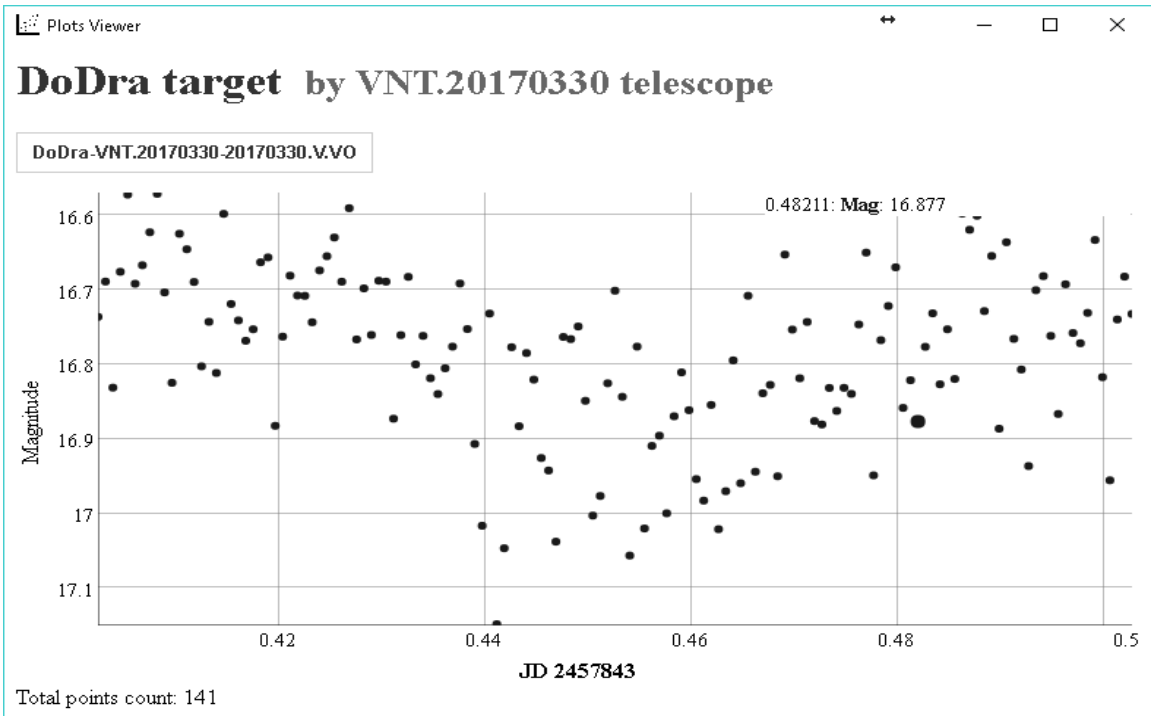


Рис. 8.10.7. Змінна зоря «Do Dra»

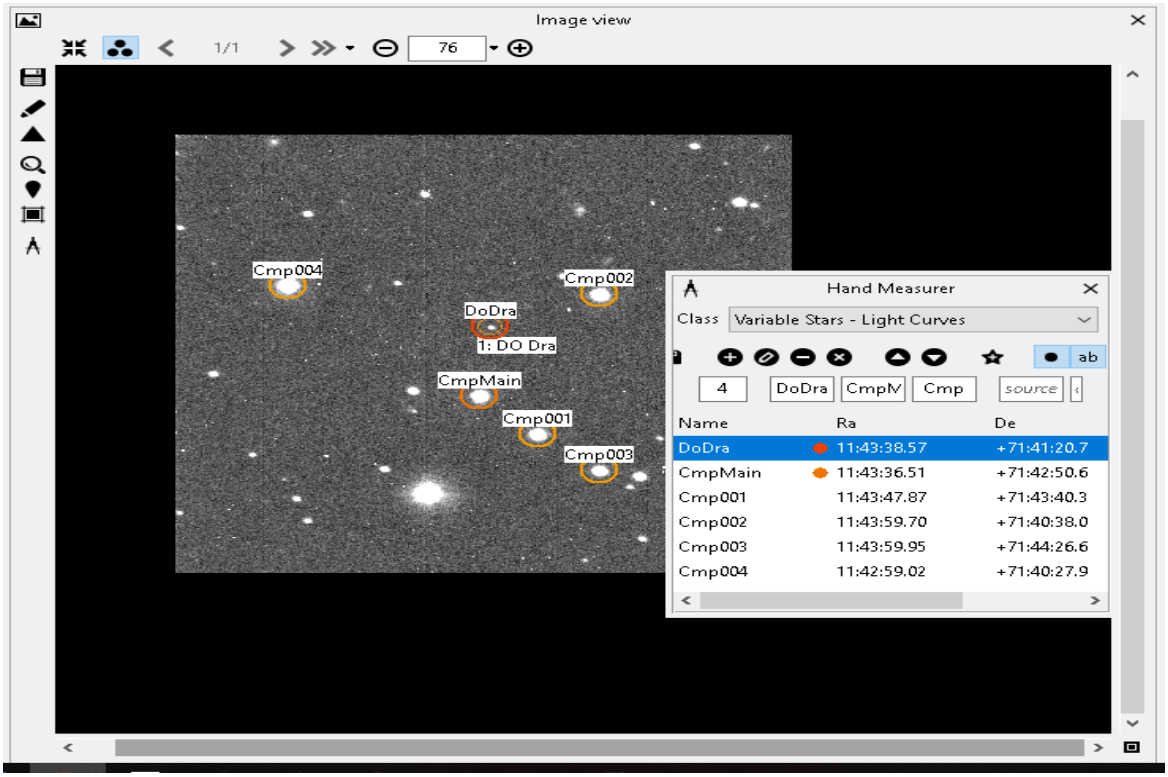


Рис. 8.10.8. Список зір порівняння

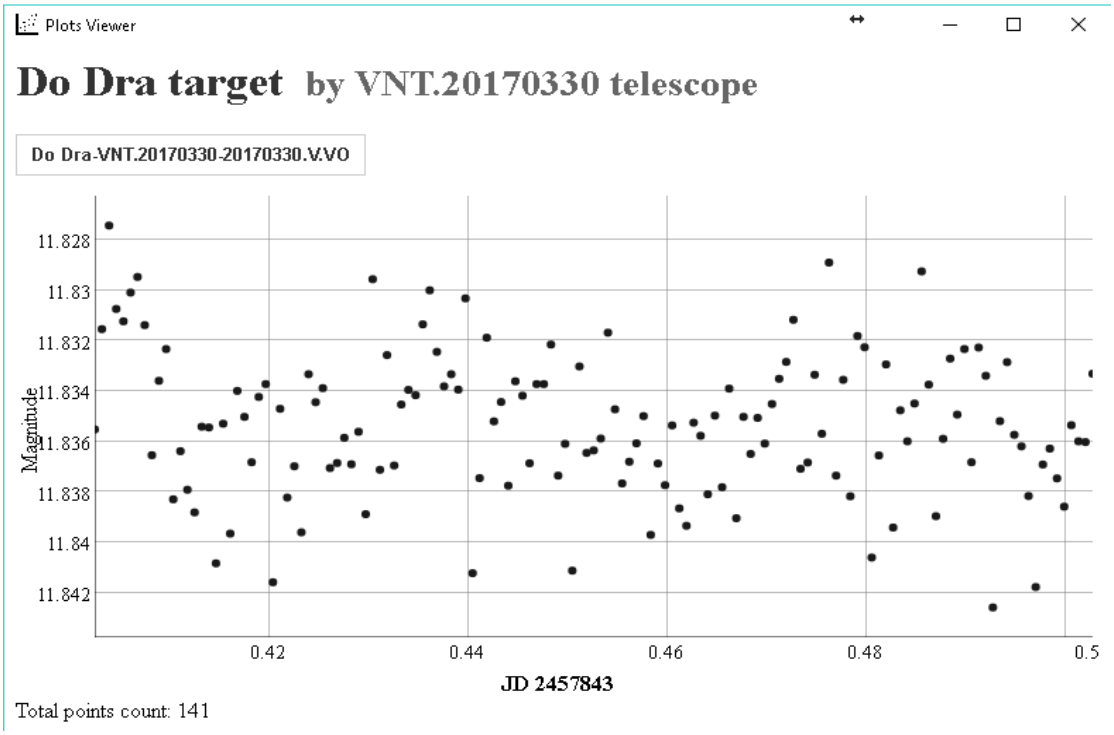


Рис. 8.10.9. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 11.84, СКВ оцінки 0.00285)

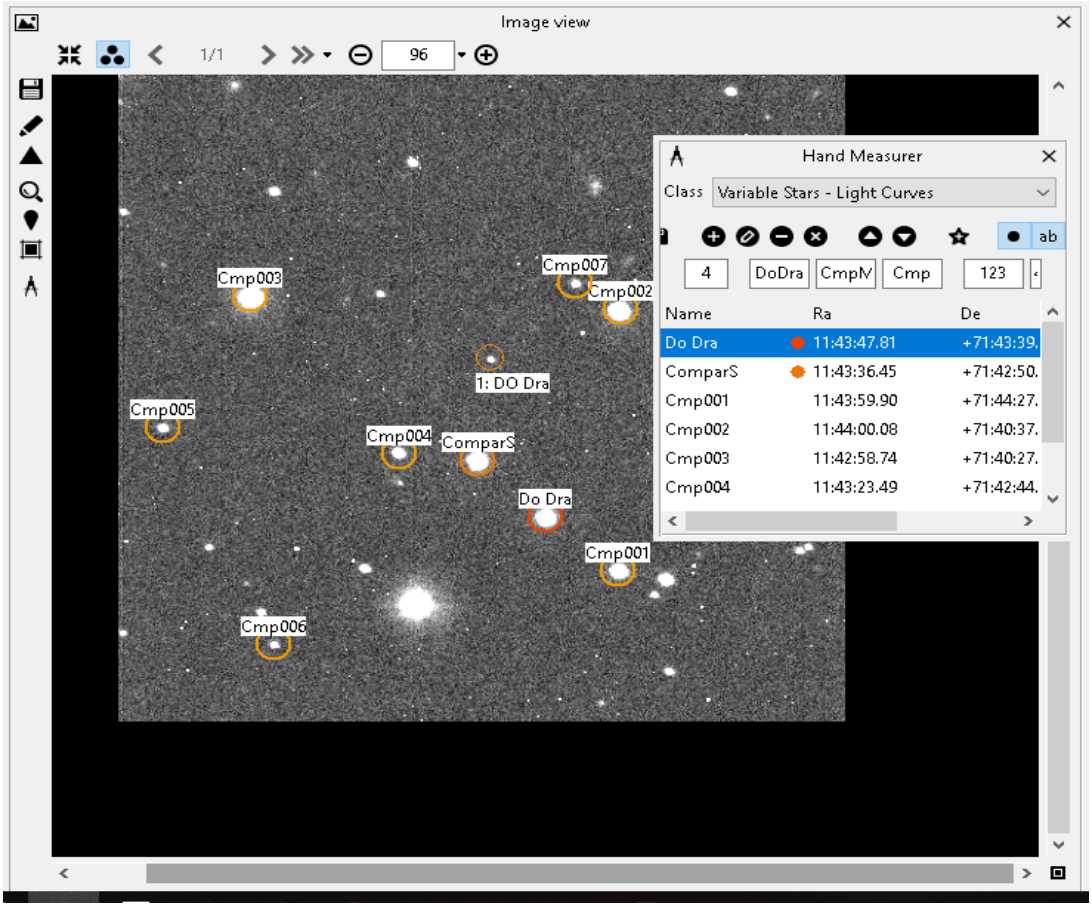


Рис. 8.10.10. Список зір порівняння

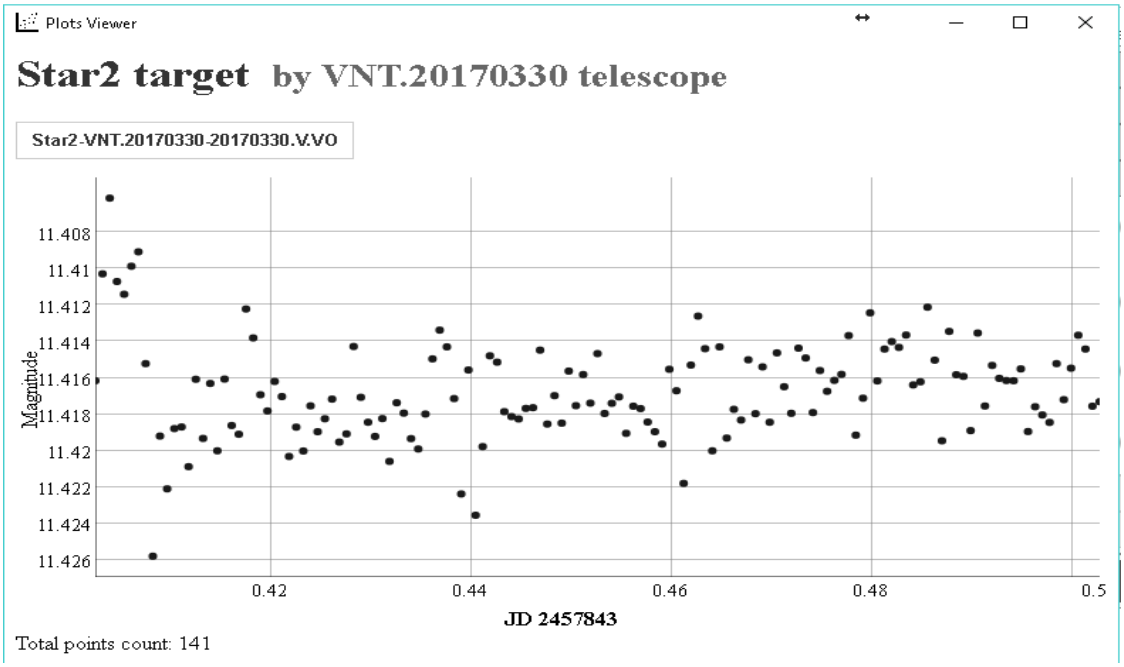


Рис. 8.10.11. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 11.42, СКВ оцінки 0.00274)

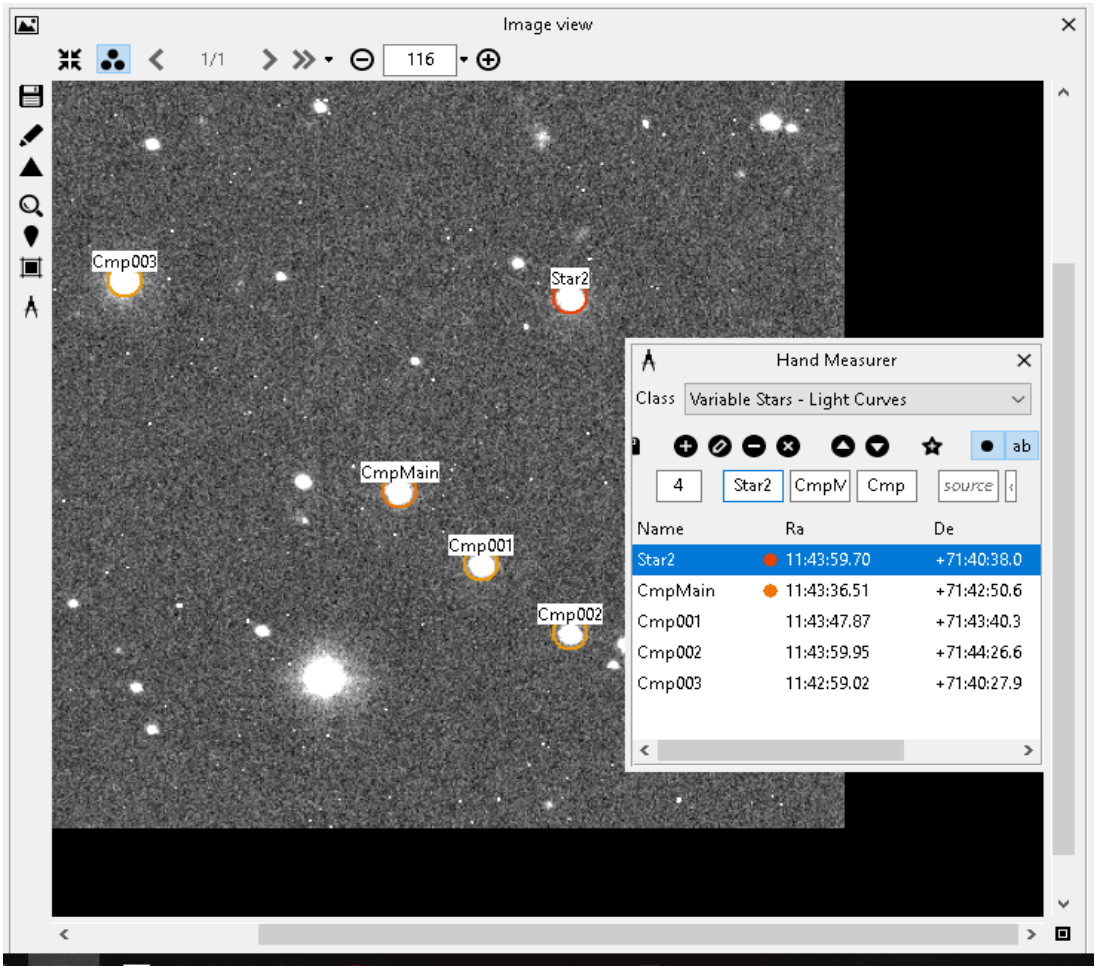


Рис. 8.10.12. Список зір порівняння

Астрофізичний інститут ім. Фесенкова (Казахстан)-серія 3 (172 кадри, апертура 700мм, фокусна відстань 6596мм, розмір кадра 2048x2048, розмір пікселя 0.018мм, кутовий розмір пікселя 0.56’’/pix, фільтр V).

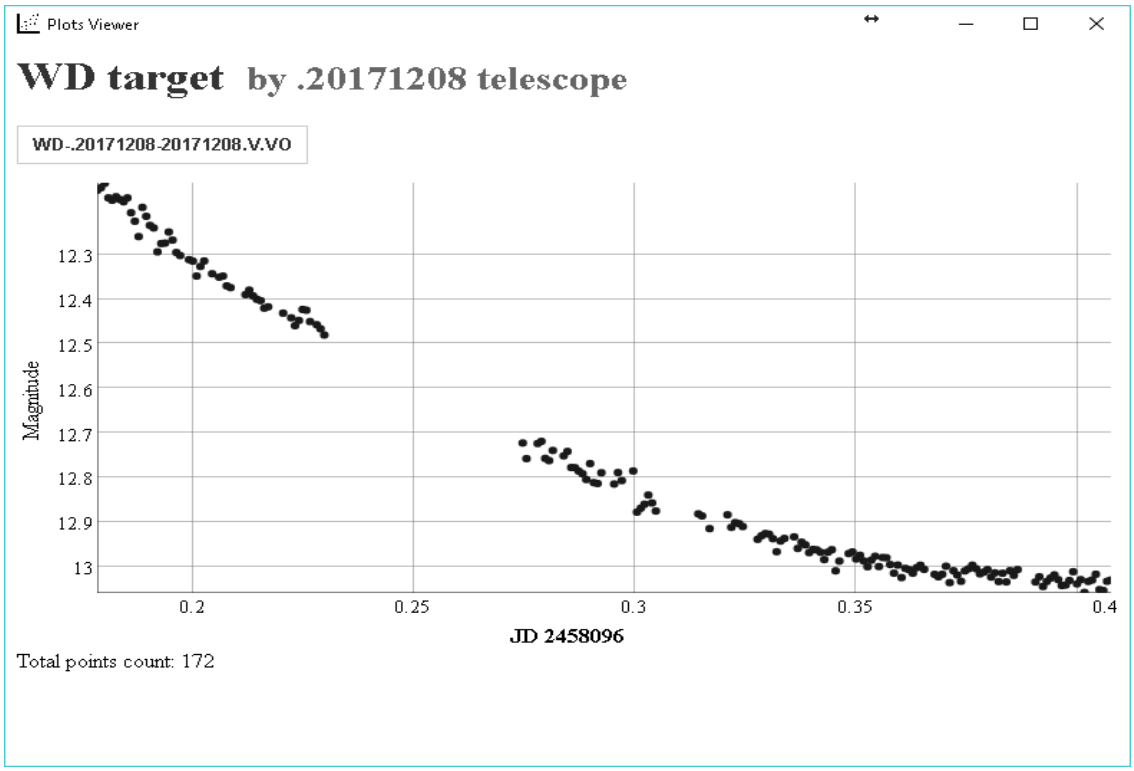


Рис. 8.10.13. Змінна зоря «WD»

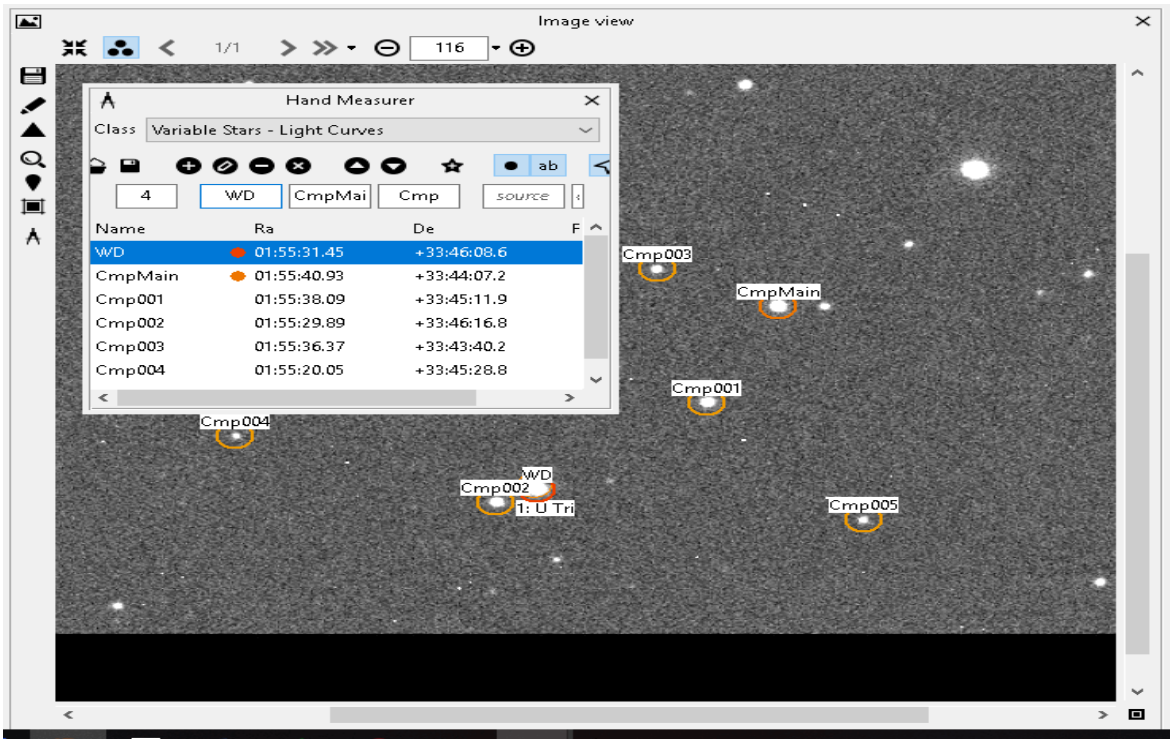


Рис. 8.10.14. Список зір порівняння

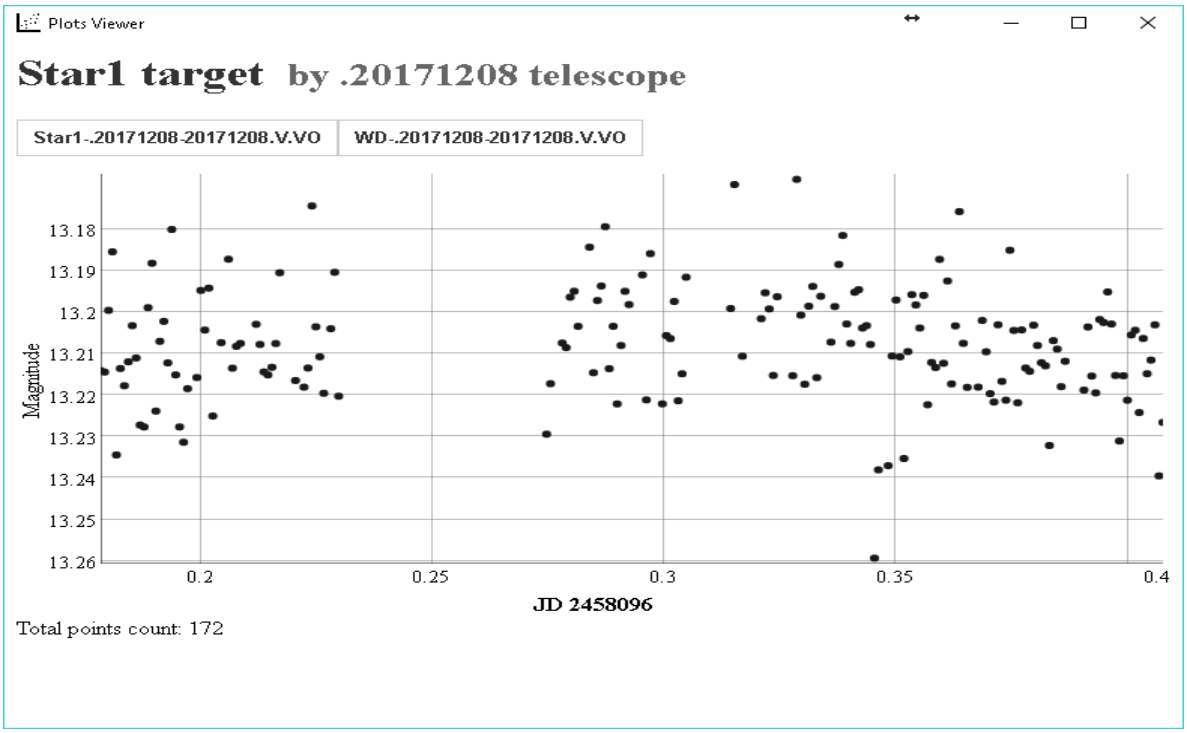


Рис. 8.10.15. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 13.21, СКВ оцінки 0.01370)

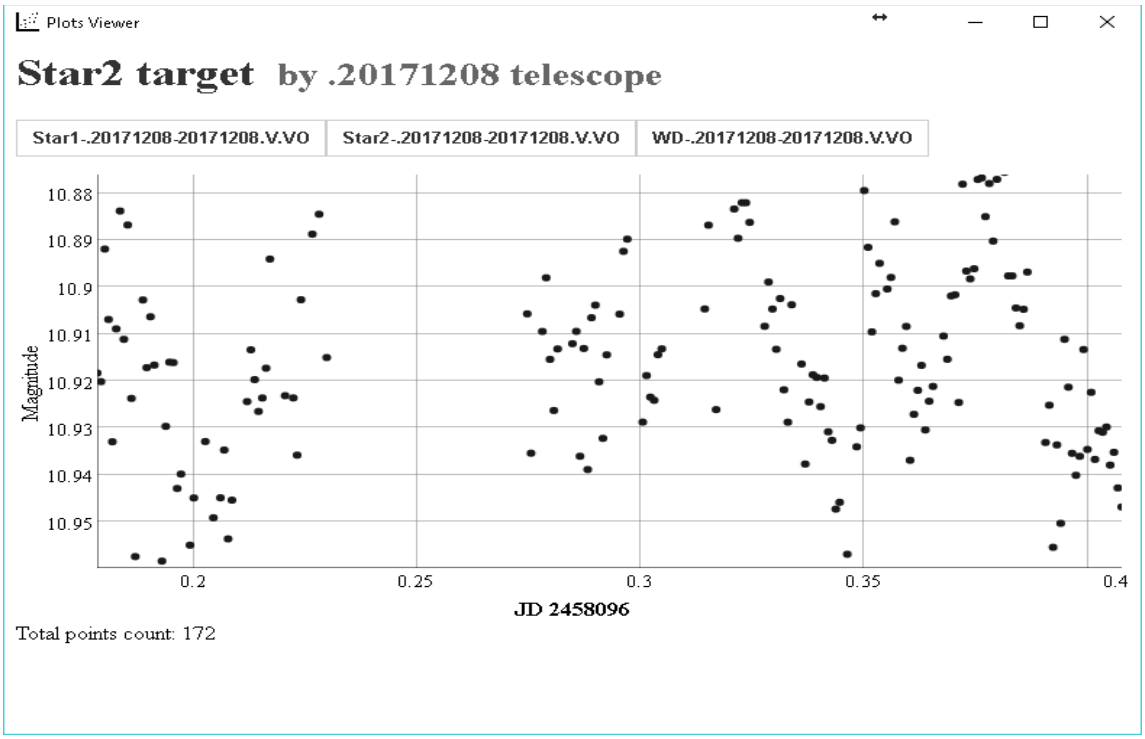


Рис. 8.10.16. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 10.92, СКВ оцінки 0.02320)

ЛКД ДВНЗ «УжНУ-серія 4 (55 кадрів, телескоп Т400, апертура 400мм, фокусна відстань 1740мм, розмір кадра 1528х1528, розмір пікселя 0.024мм, кутовий розмір пікселя 2.84’’/pix, фільтр B).

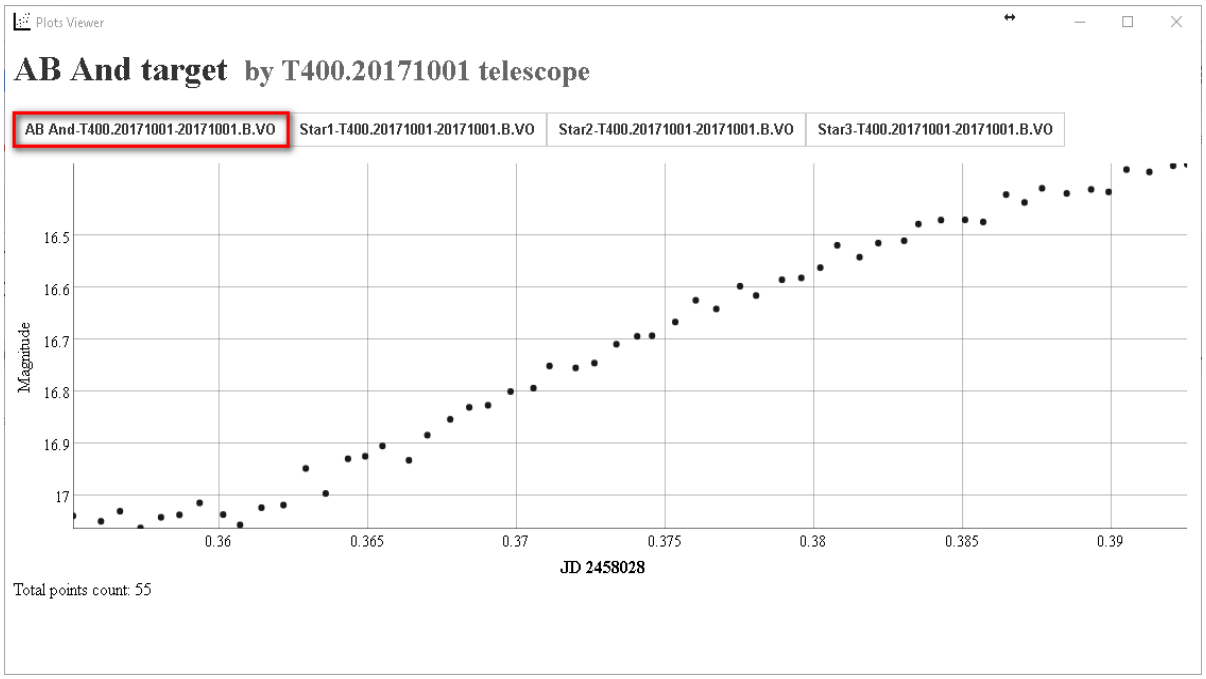


Рис. 8.10.17. Змінна зоря «AB And»

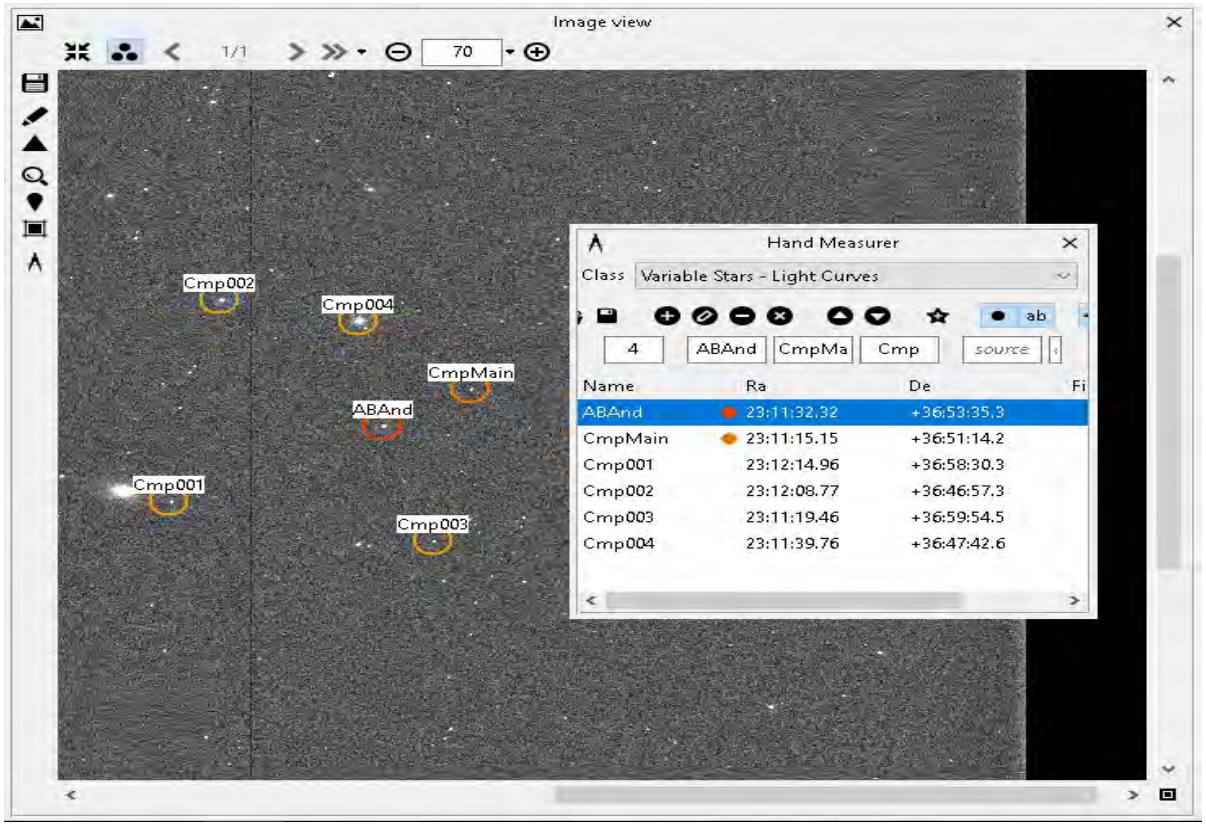


Рис. 8.10.18. Список зір порівняння

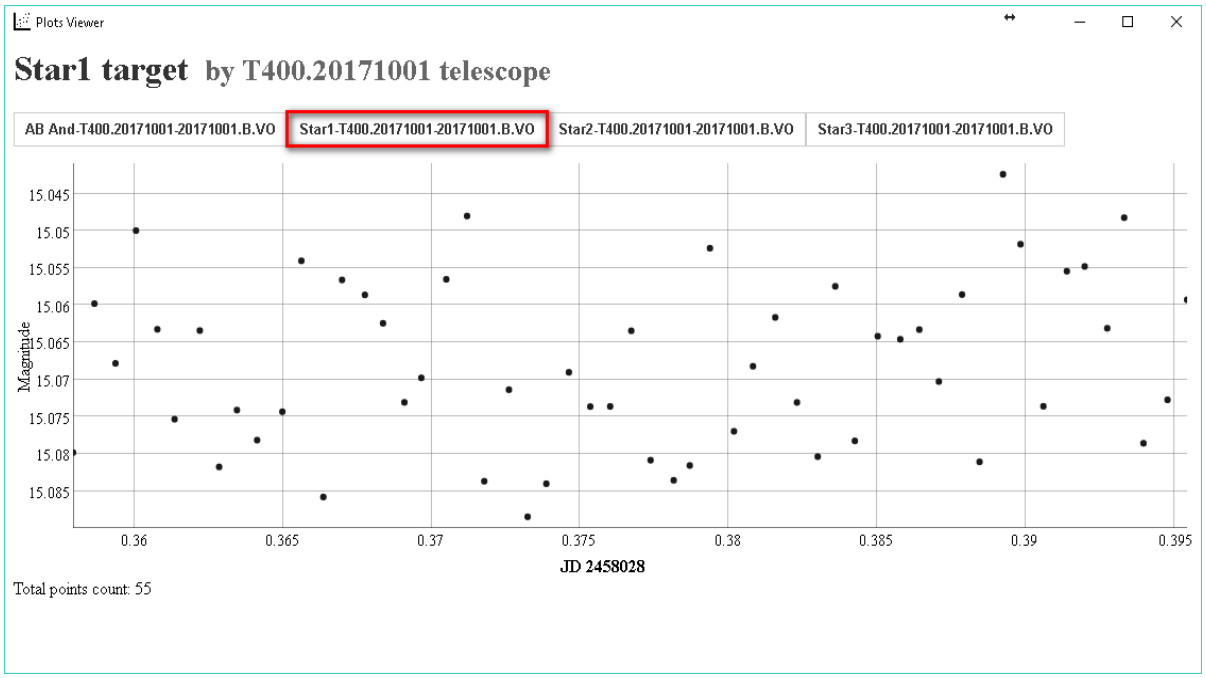


Рис. 8.10.19. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 15.07, СКВ оцінки 0.01120)

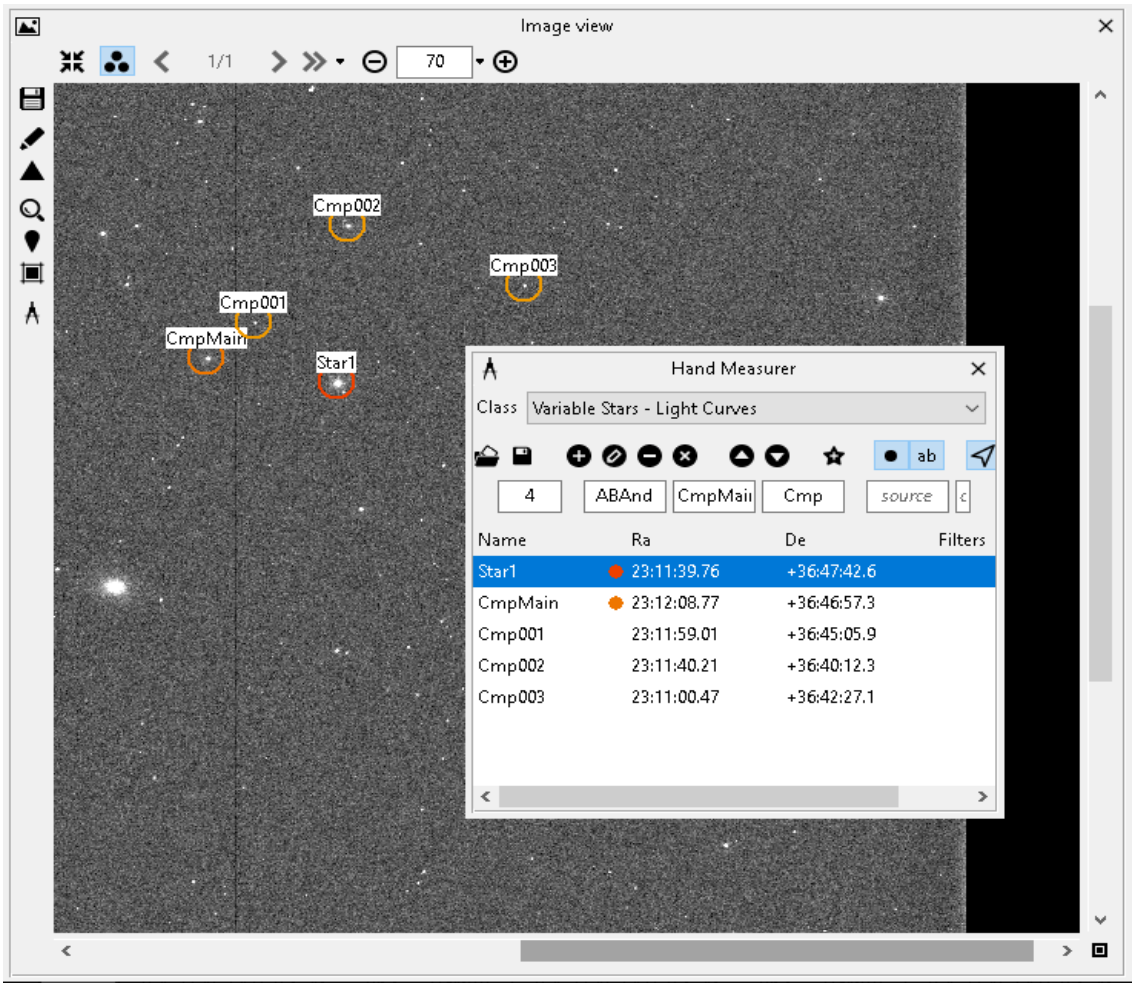


Рис. 8.10.20. Список зір порівняння

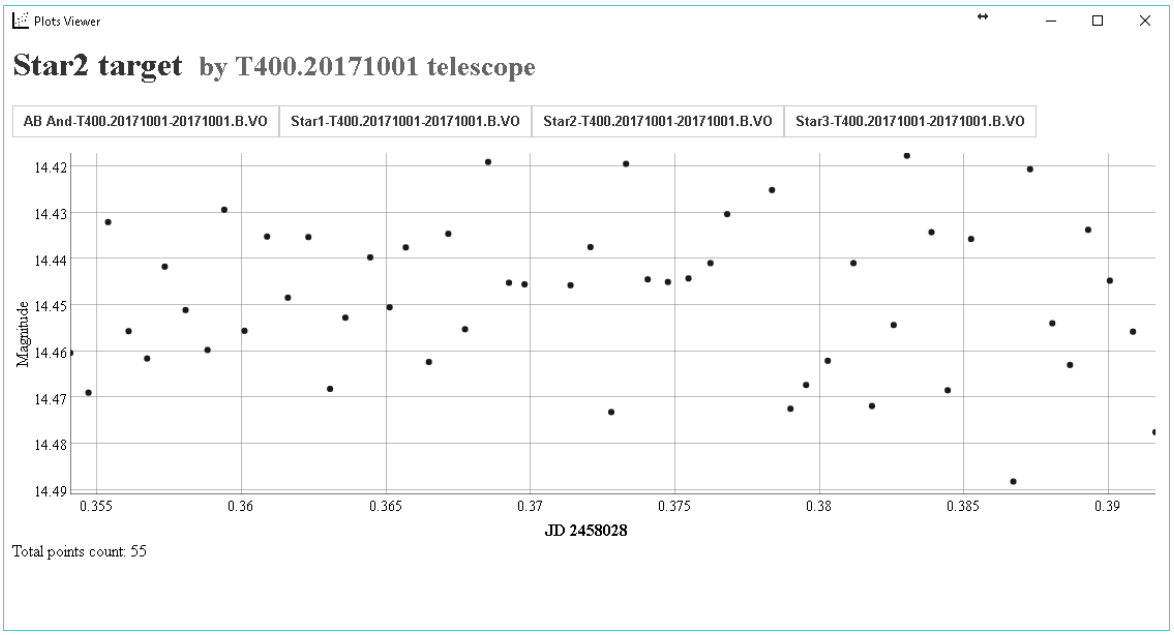


Рис. 8.10.21. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 14.45, СКВ оцінки 0.01520)

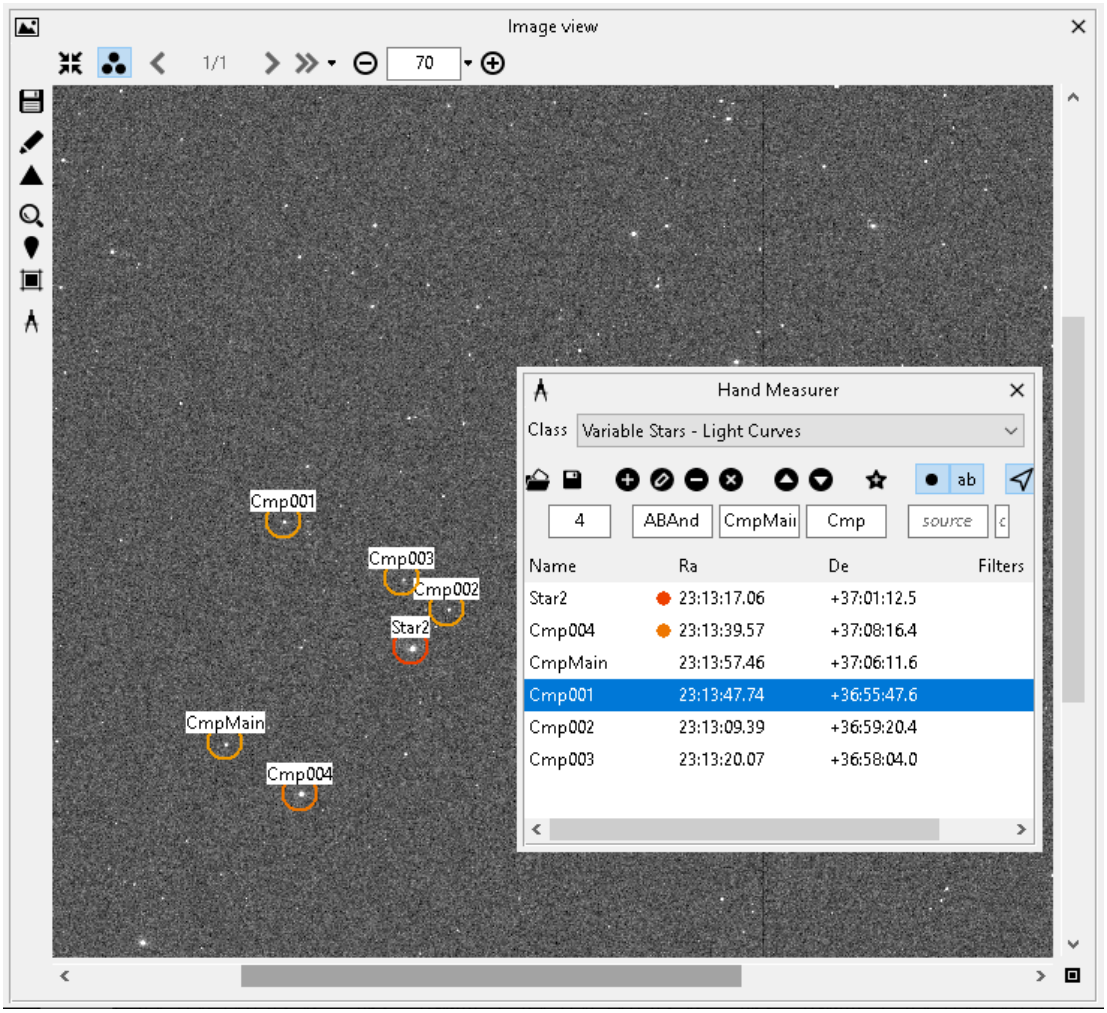


Рис. 8.10.22. Список зір порівняння

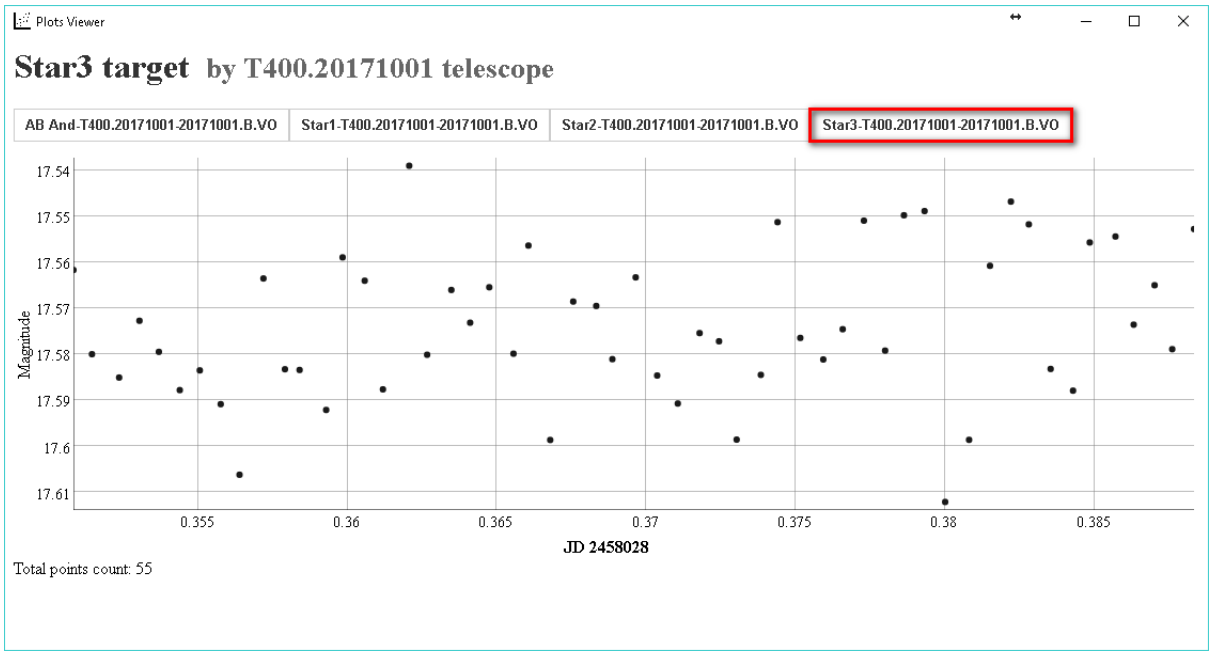


Рис. 8.10.23. Постійна зоря «№3» (середнє значення оцінки 17.57, СКВ оцінки 0.01603)

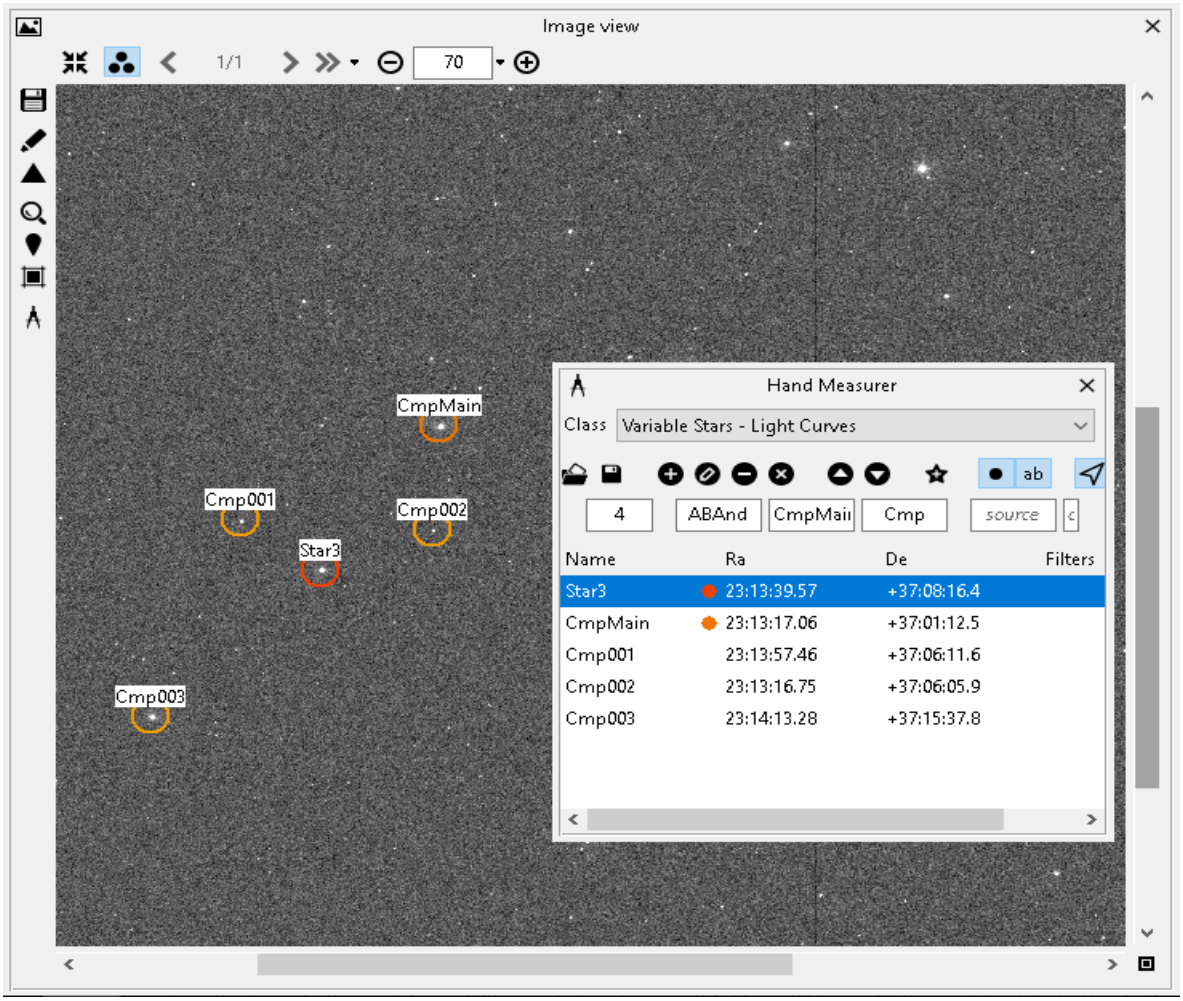


Рис. 8.10.24. Список зір порівняння

ЛКД ДВНЗ «УжНУ -серія 5 (182 кадри, телескоп Т400, апертура 400мм, фокусна відстань 1740мм, розмір кадра 1528х1528, розмір пікселя 0.024мм, кутовий розмір пікселя 2.84’’/pix, фільтр V).

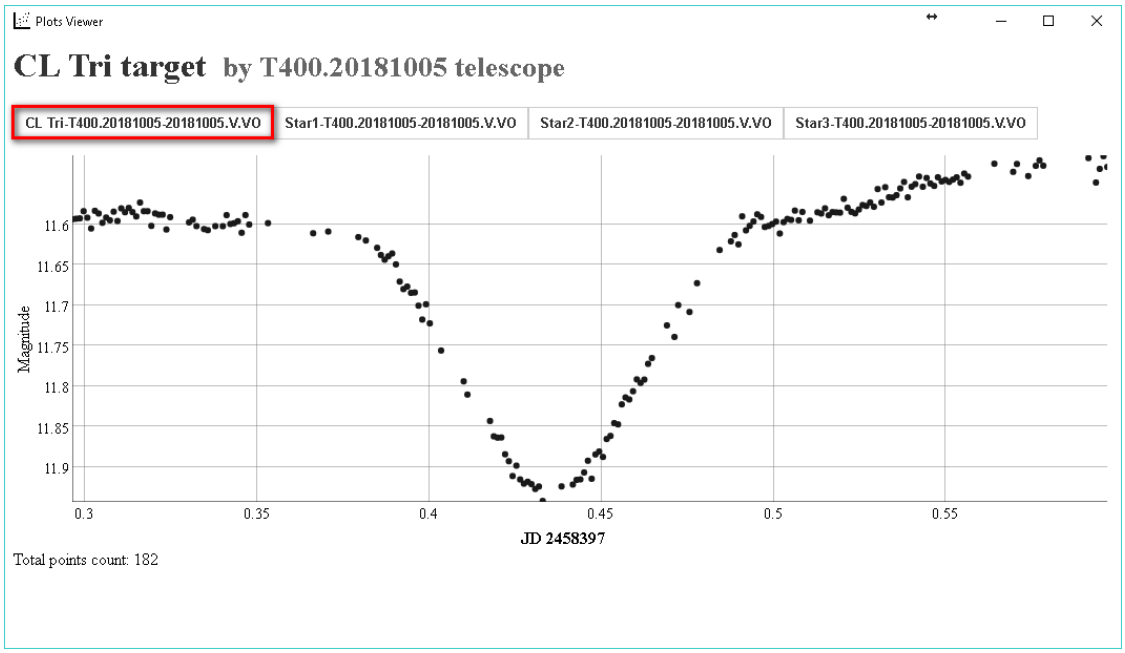


Рис. 8.10.25. Змінна зоря CL Tri

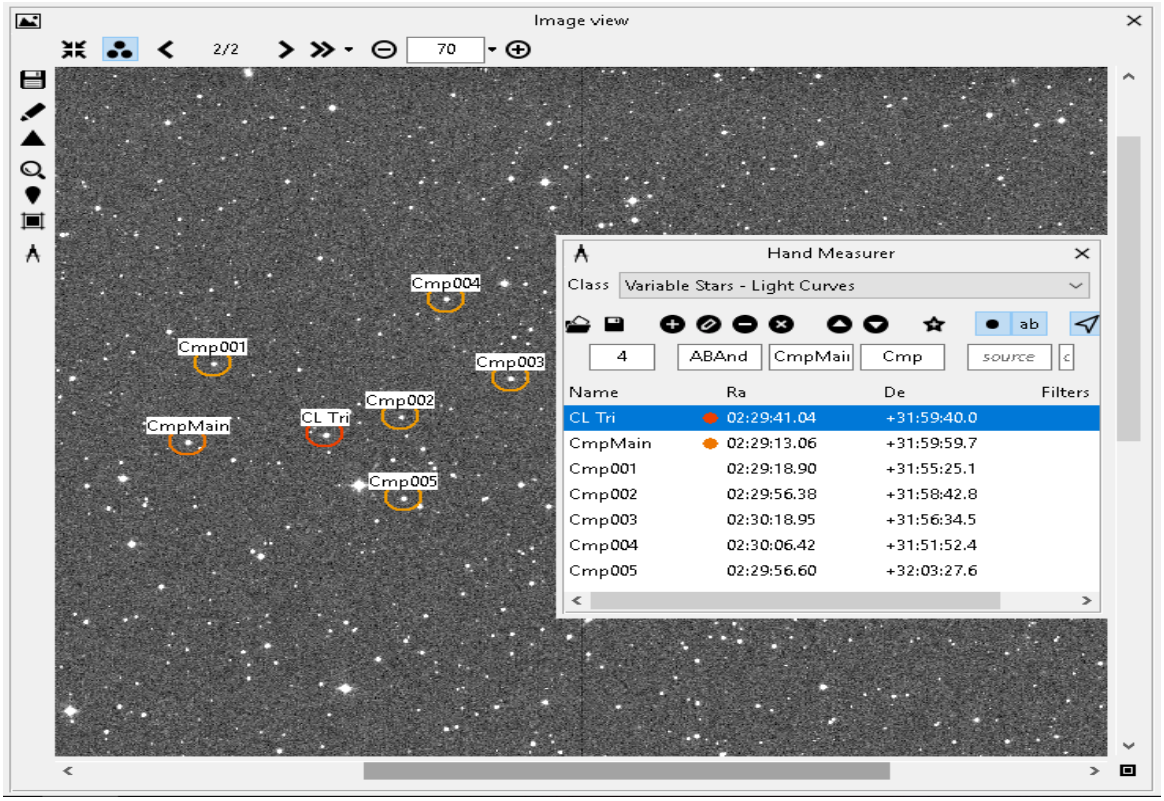


Рис. 8.10.26. Список зір порівняння

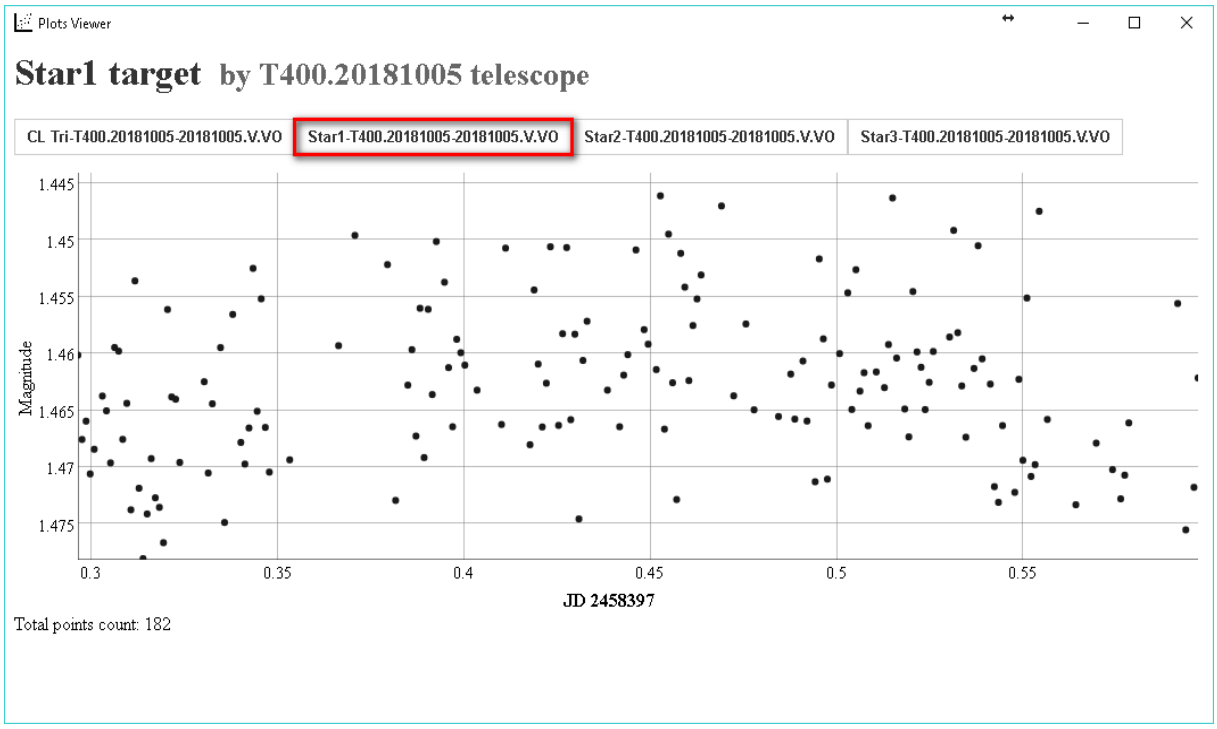


Рис. 8.10.27. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 1.46, СКВ оцінки 0.01447)

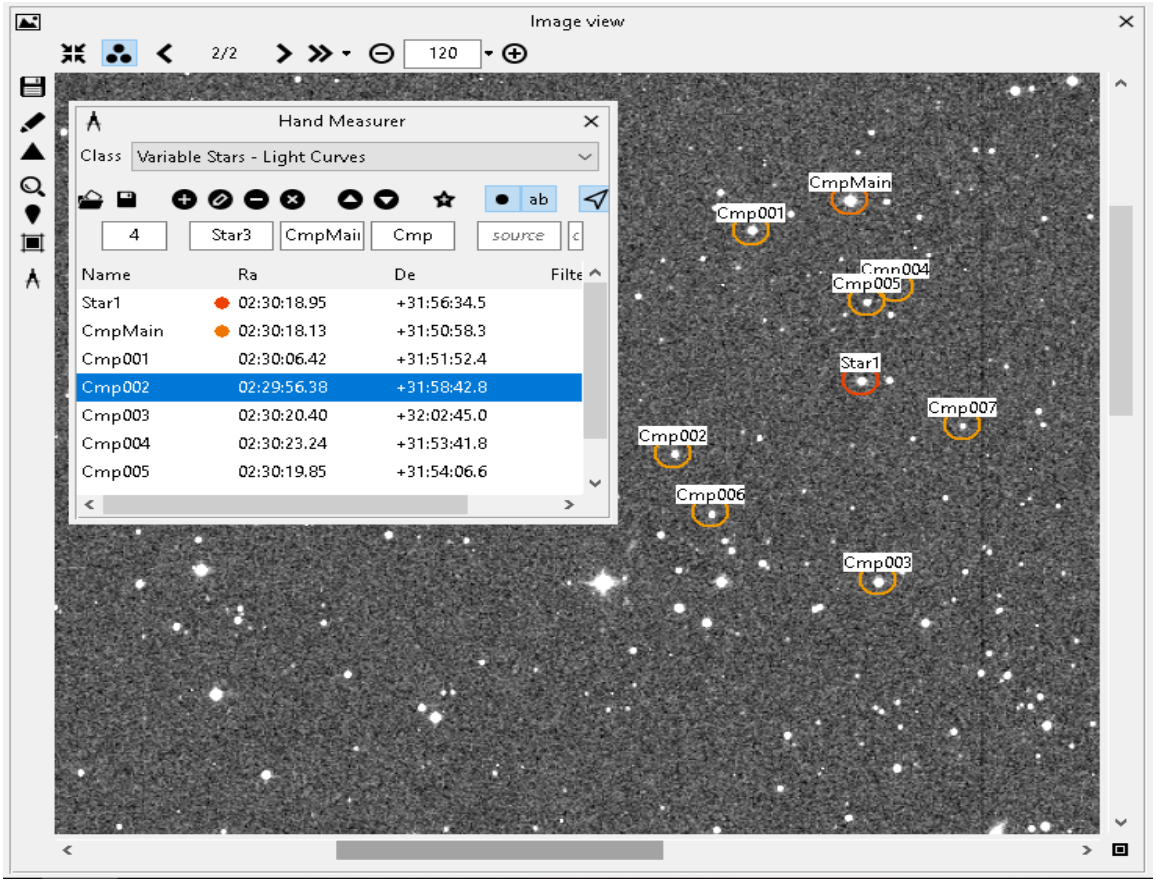


Рис. 8.10.28. Список зір порівняння

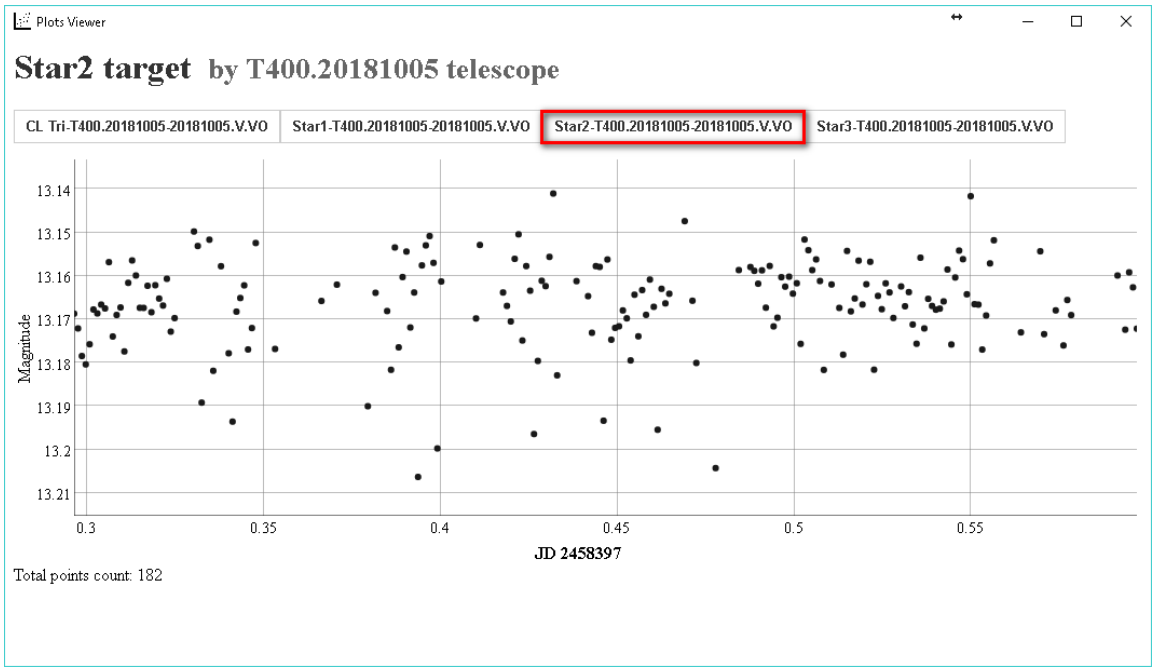


Рис. 8.10.29. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 13.17, СКВ оцінки 0.01405)

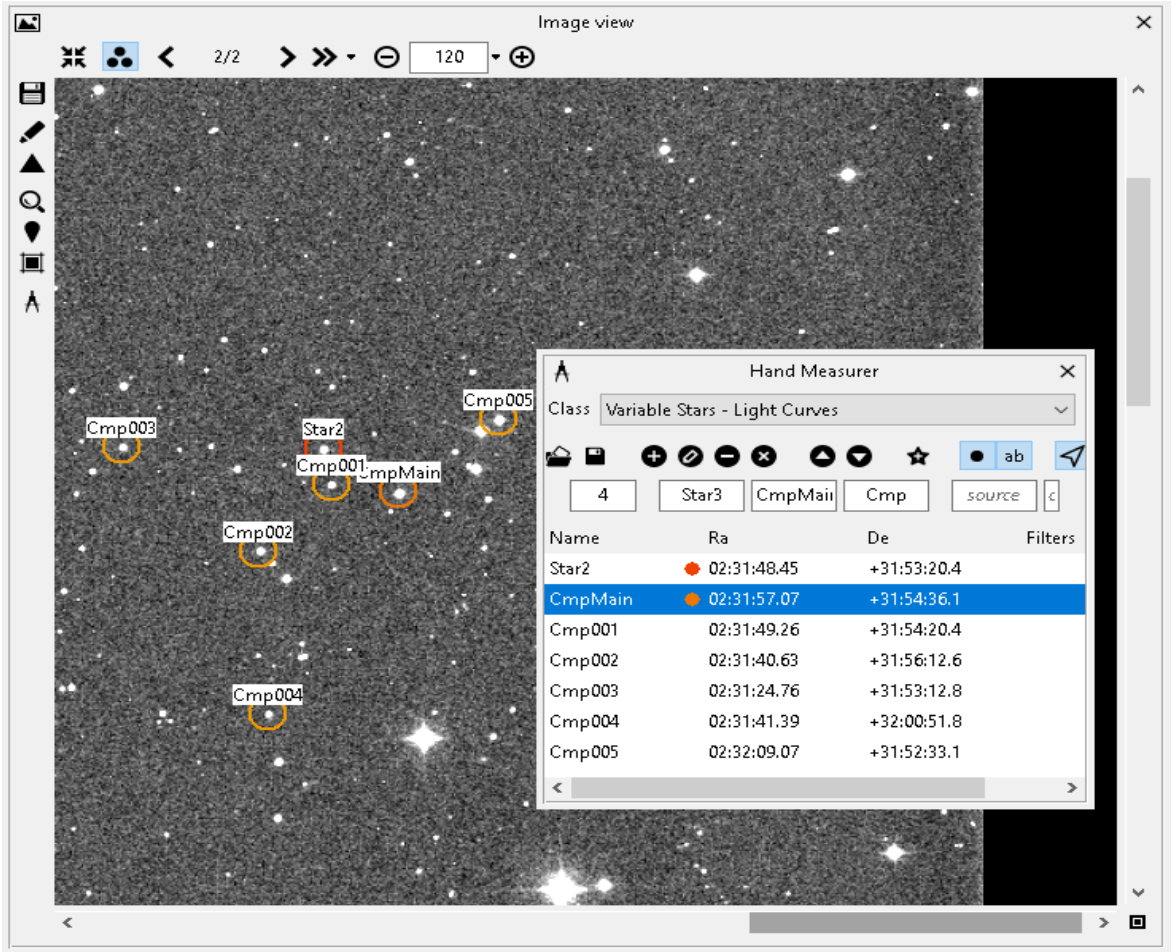


Рис. 8.10.30. Список зір порівняння

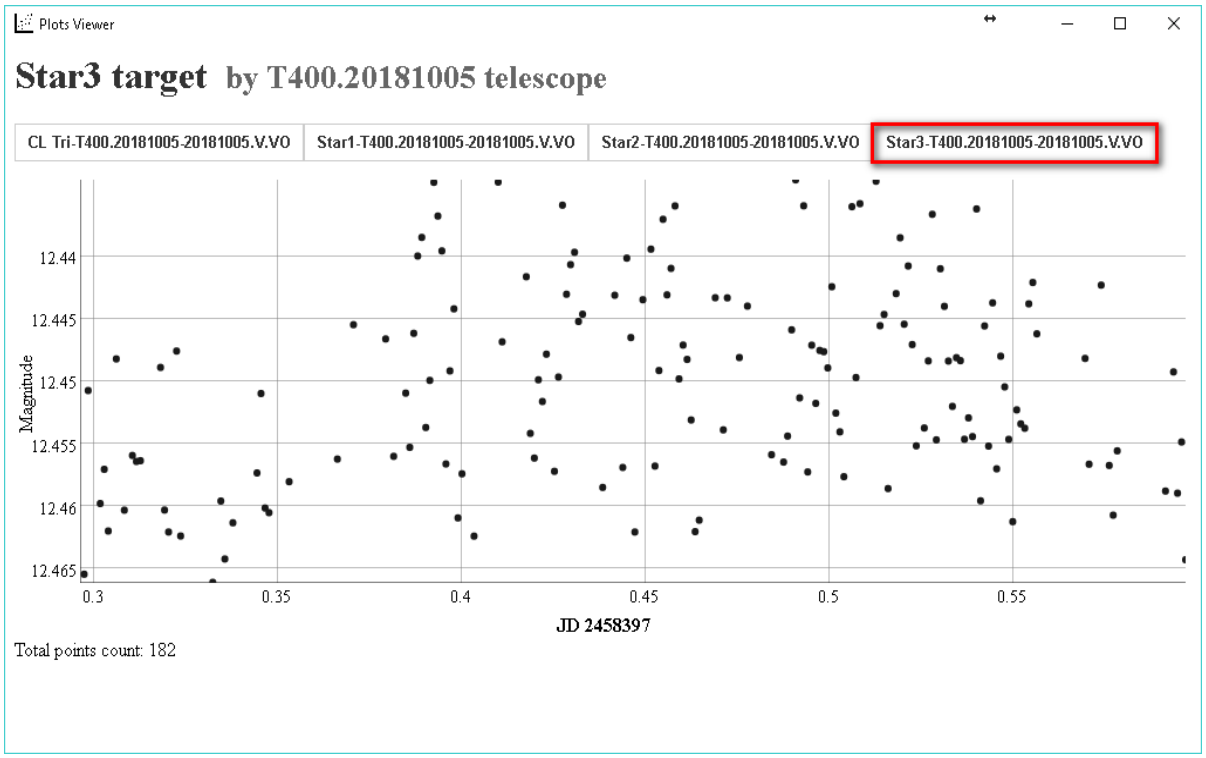


Рис. 8.10.31. Постійна зоря «№3» (середнє значення оцінки 12.45, СКВ оцінки 0.01067)

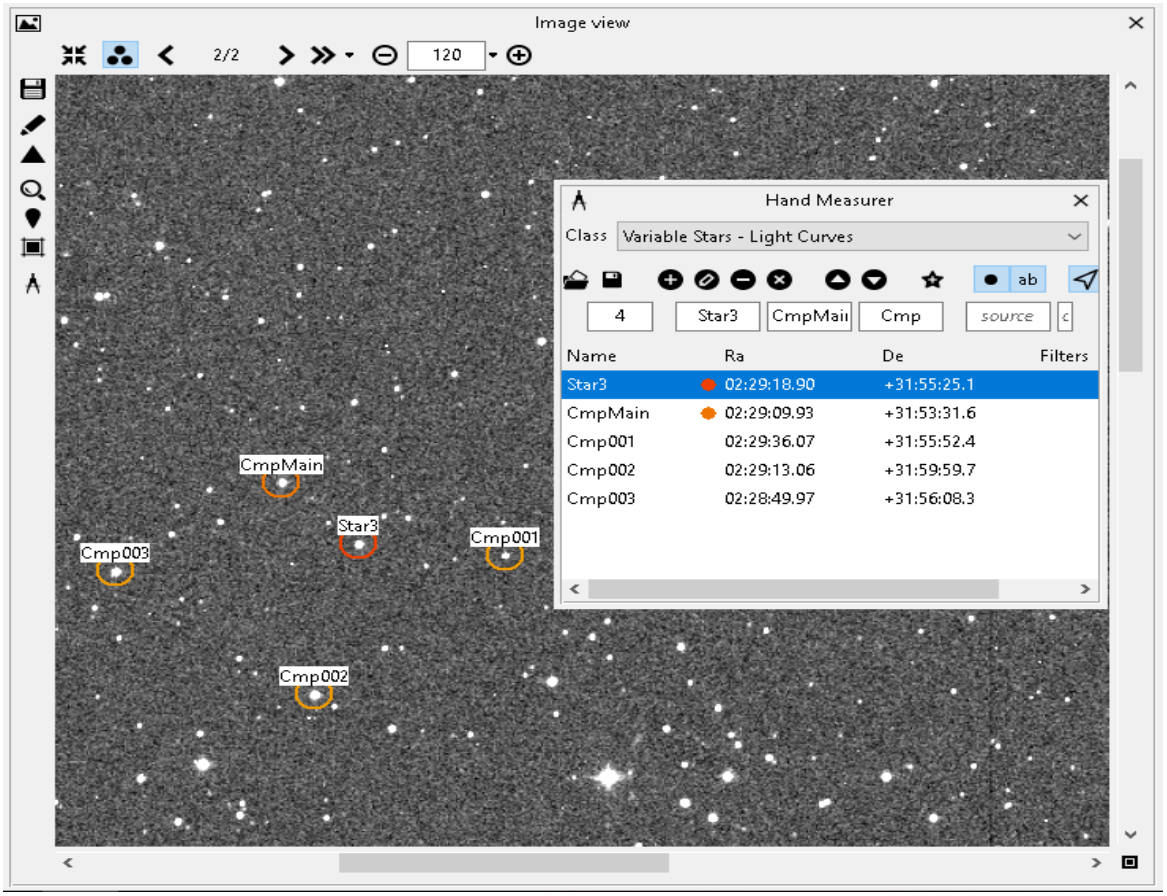


Рис. 8.10.32. Список зір порівнянння

Одеська астрономічна обсерваторія-серія 6 (105 кадрів, телескоп OMT-800, апертура 800мм, фокусна відстань 2140мм, розмір кадра 3056x3056, розмір пікселя 0.012мм, кутовий розмір пікселя 1.15’’/pix, без фільтра).

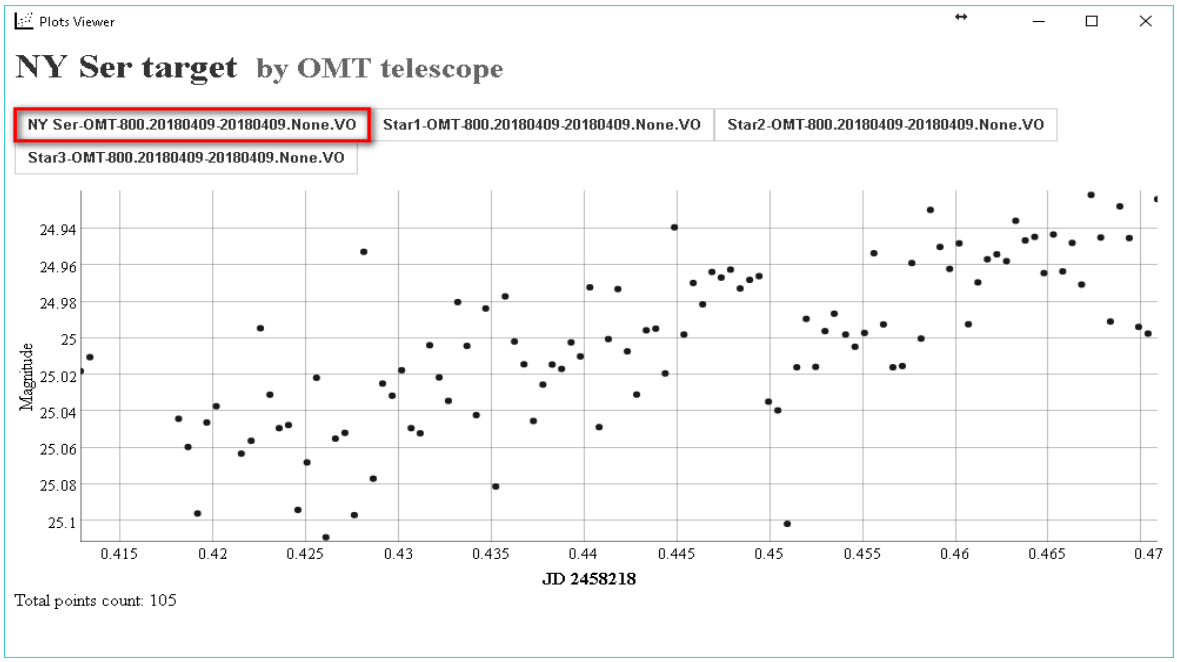


Рис. 8.10.33. Змінна зоря «NY Ser»

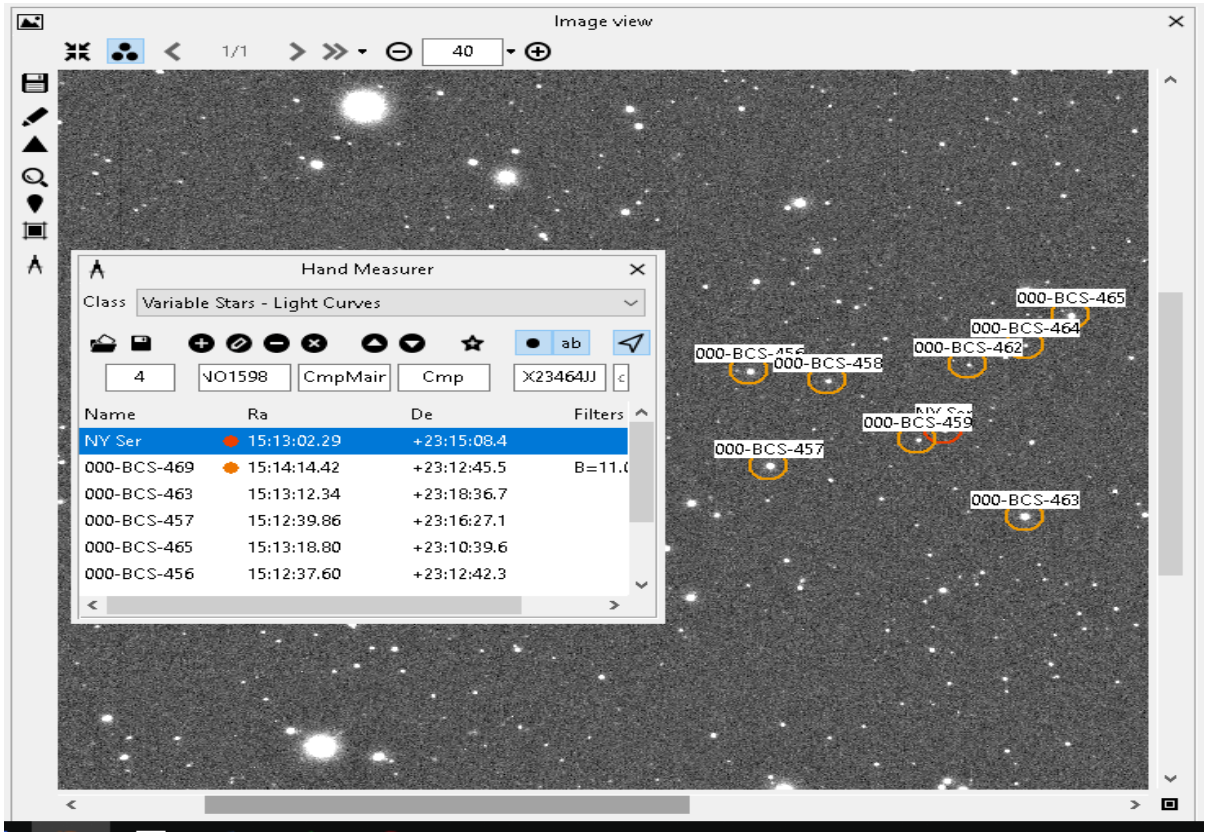


Рис. 8.10.34. Список зір порівняння

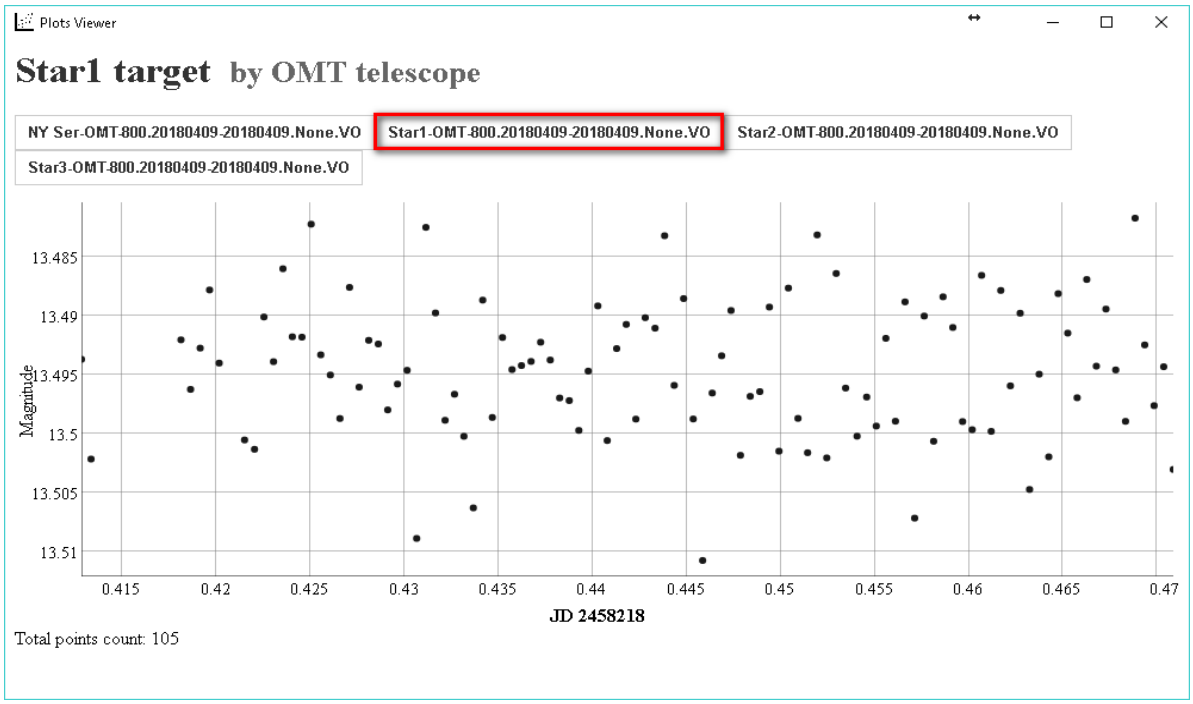


Рис. 8.10.35. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 13.49, СКВ оцінки 0.00578)

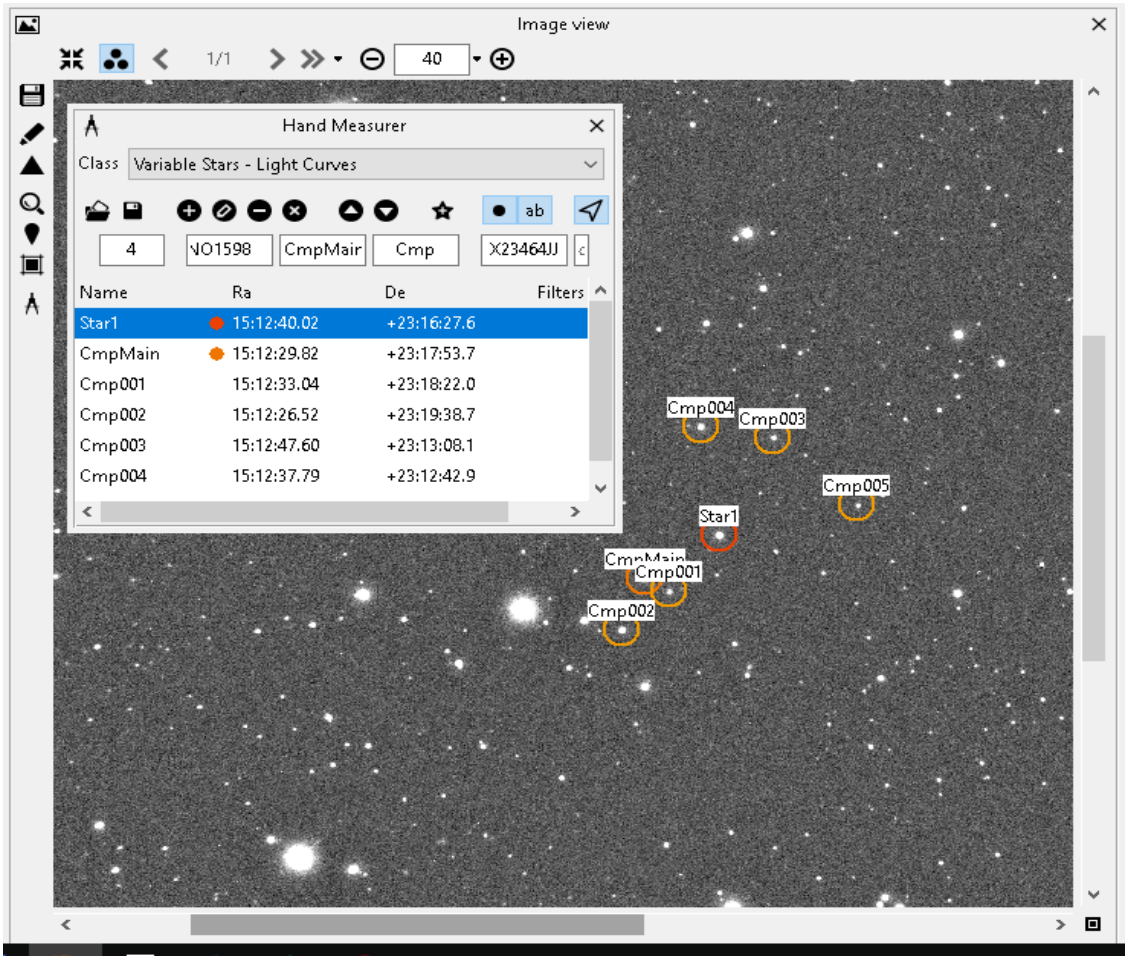


Рис. 8.10.36. Список зір порівняння

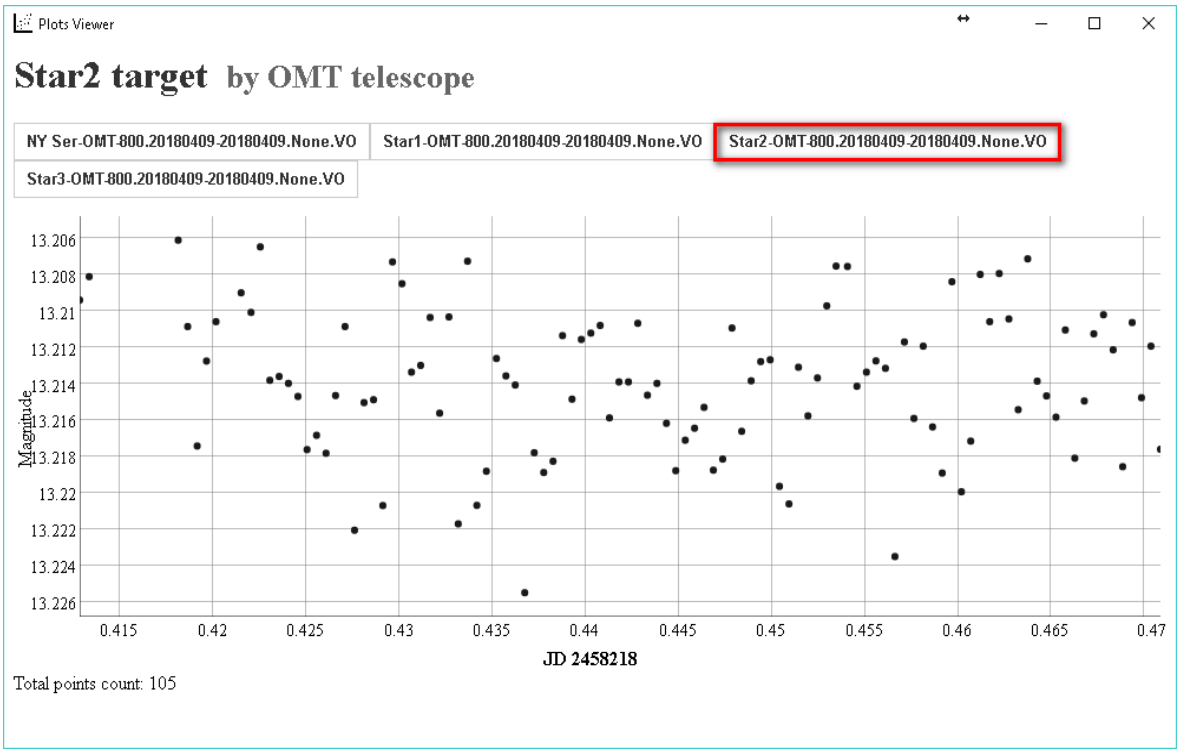


Рис. 8.10.37. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 13.21, СКВ оцінки 0.0040)

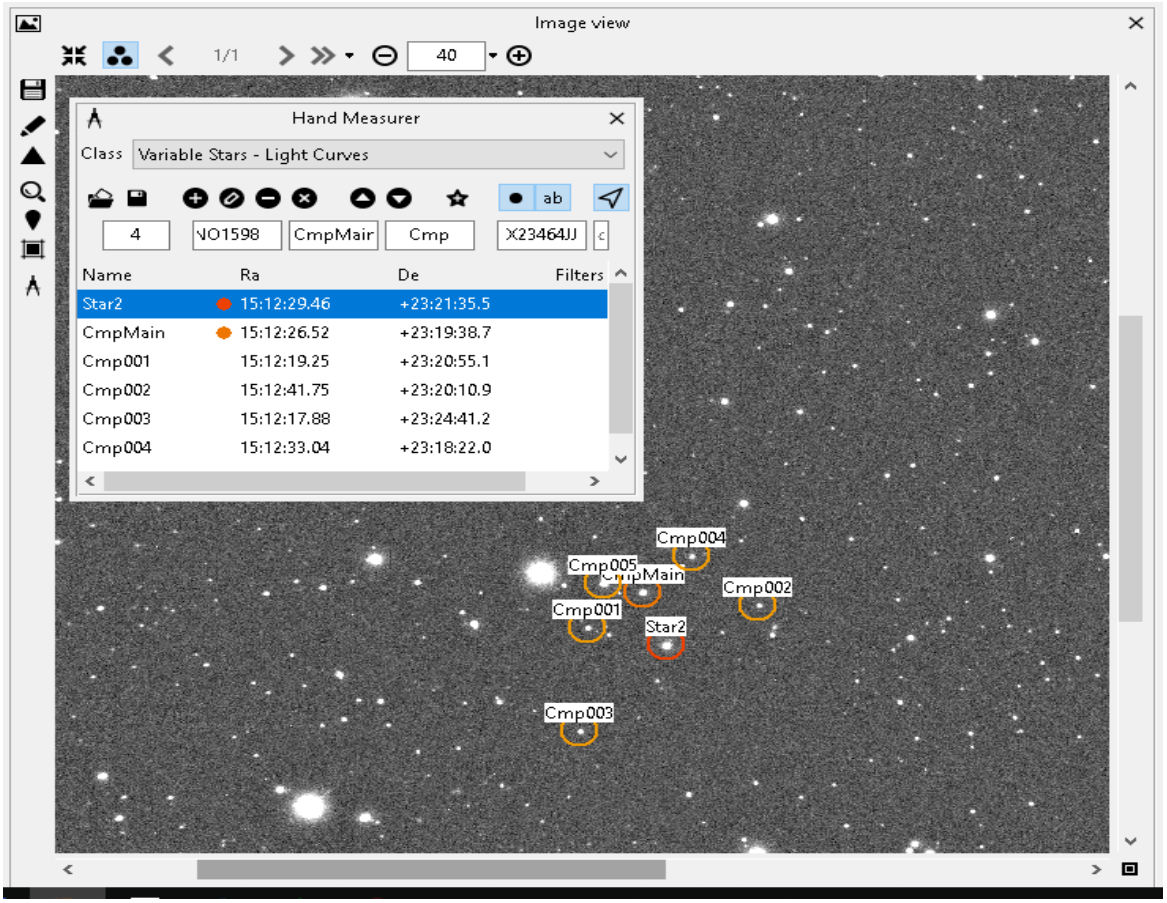


Рис. 8.10.38. Список зір порівняння

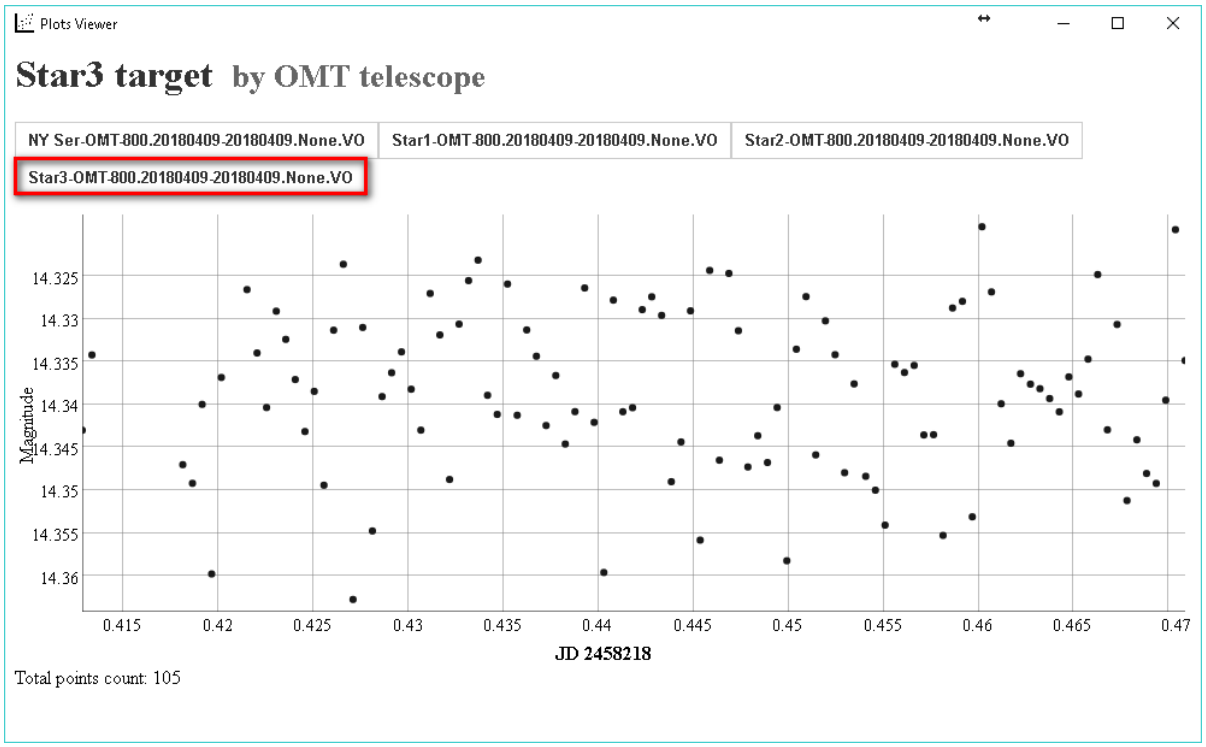


Рис. 8.10.39. Постійна зоря «№3» (середнє значення оцінки 14.34, СКВ оцінки 0.00940)

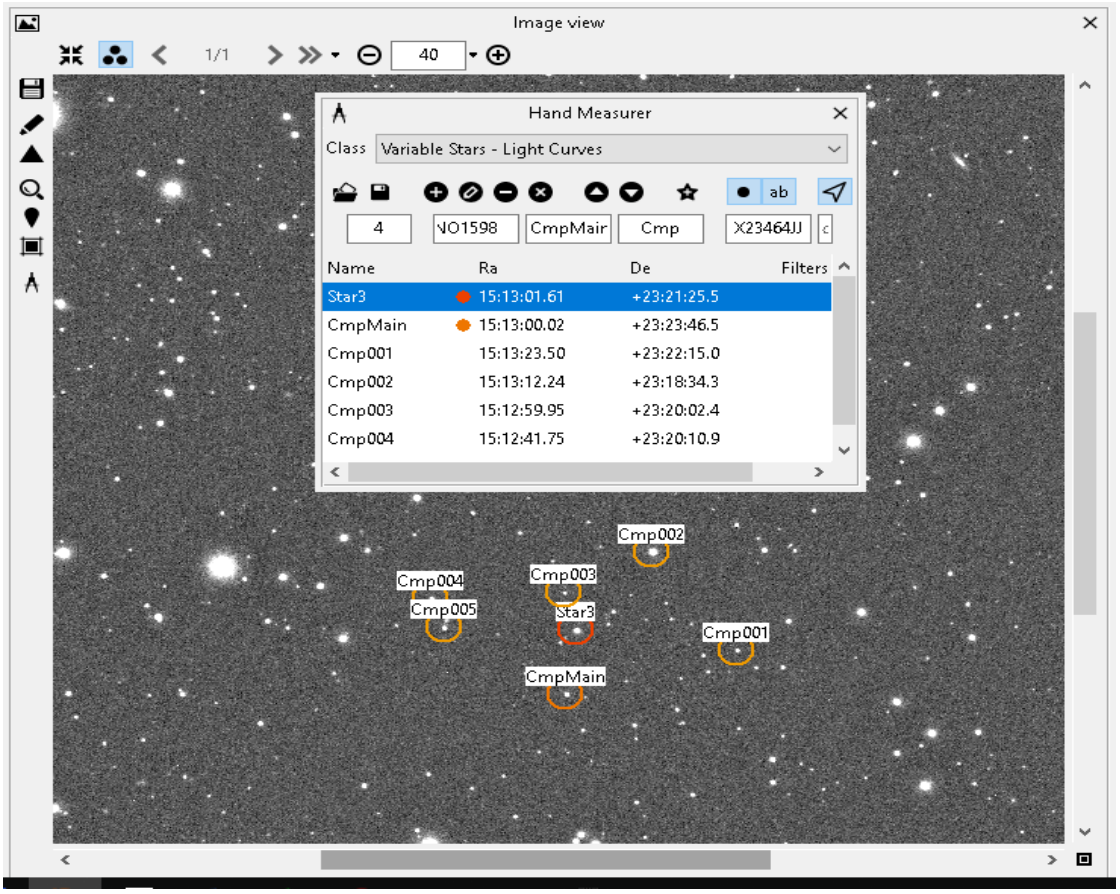


Рис. 8.10.40. Список зір порівняння

Одеська астрономічна обсерваторія -серія 7 (105 кадрів, телескоп OMT-800, апертура 800мм, фокусна відстань 2140мм, розмір кадра 3056x3056, розмір пікселя 0.012мм, кутовий розмір пікселя 1.15’’/pix, без фільтра).

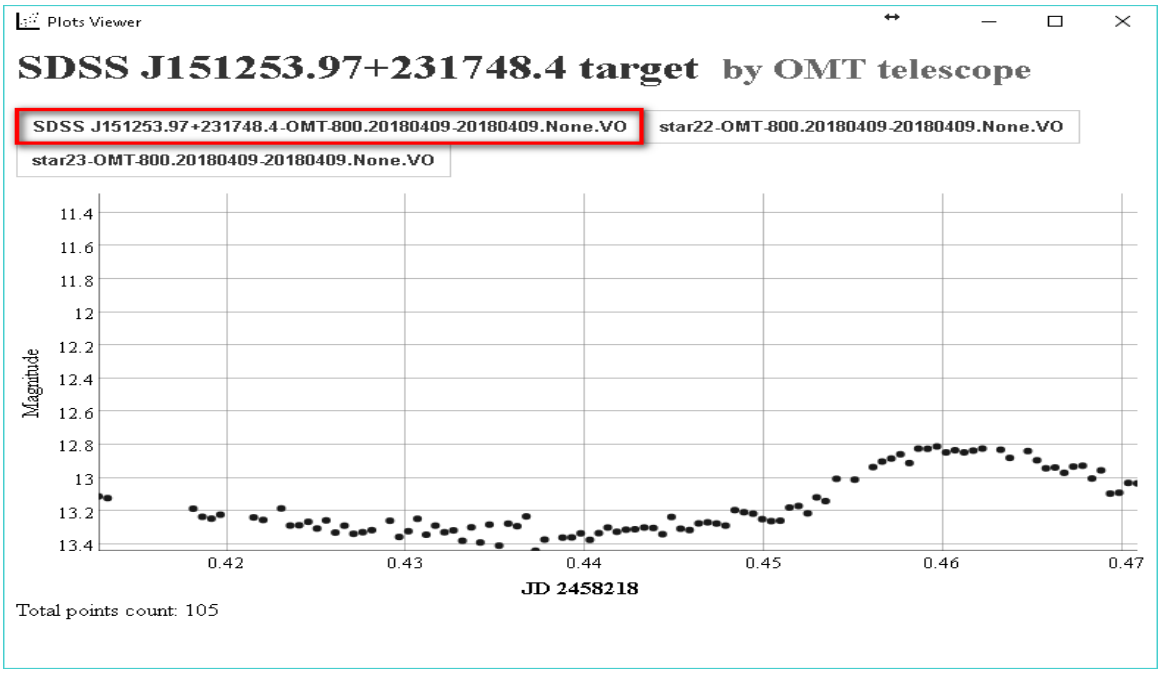


Рис. 8.10.41. Змінна зоря «SDSS J151253»

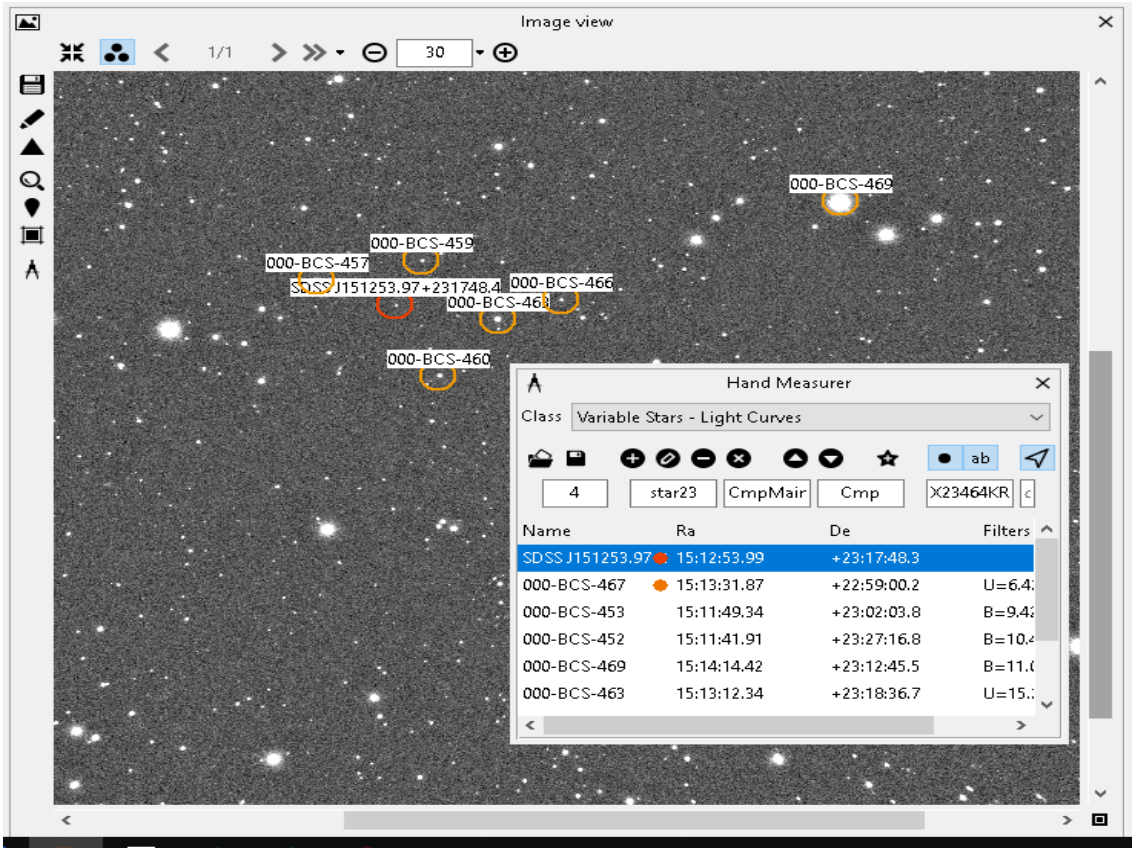


Рис. 8.10.42. Список зір порівняння

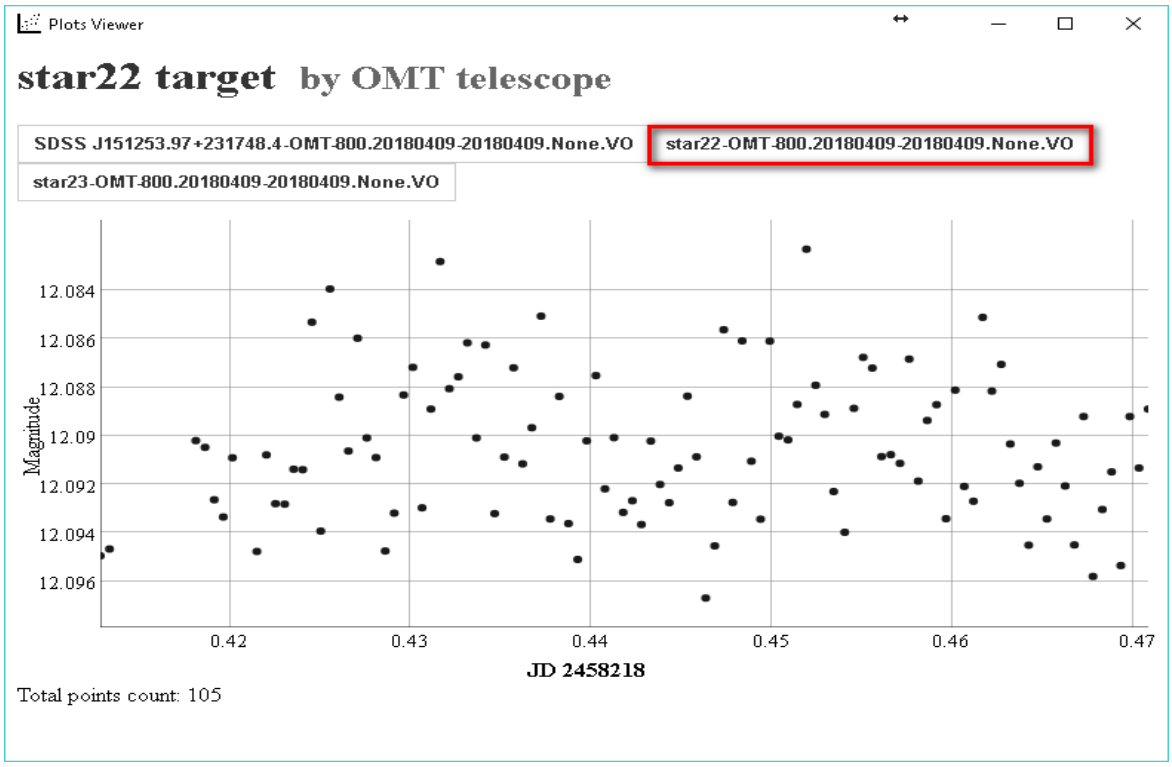


Рис. 8.10.43. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 12.09, СКВ оцінки 0.00299)

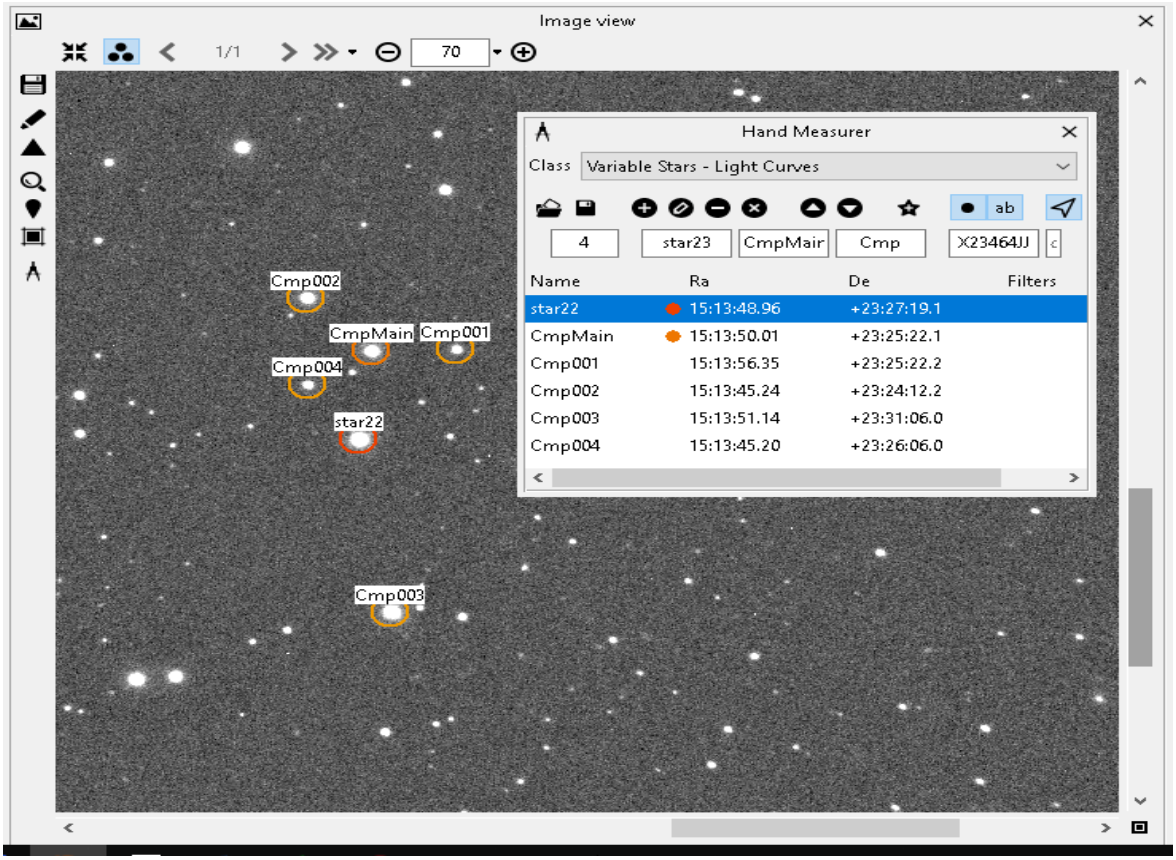


Рис. 8.10.44. Список зір порівняння

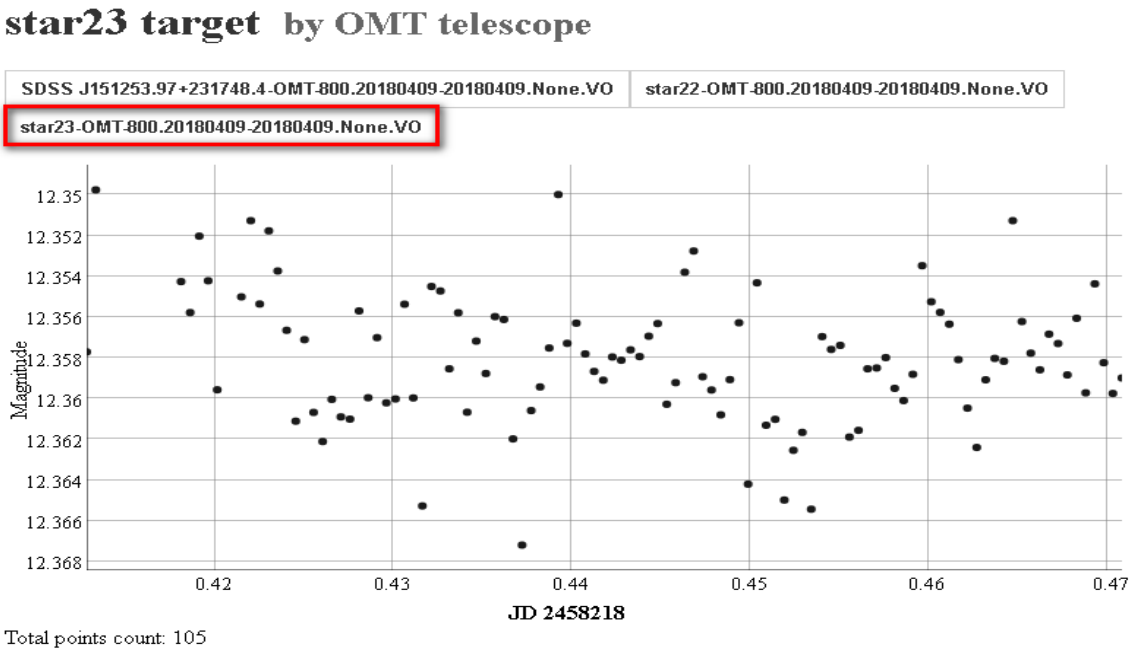


Рис. 8.10.45. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 12.36, СКВ оцінки 0.00320)

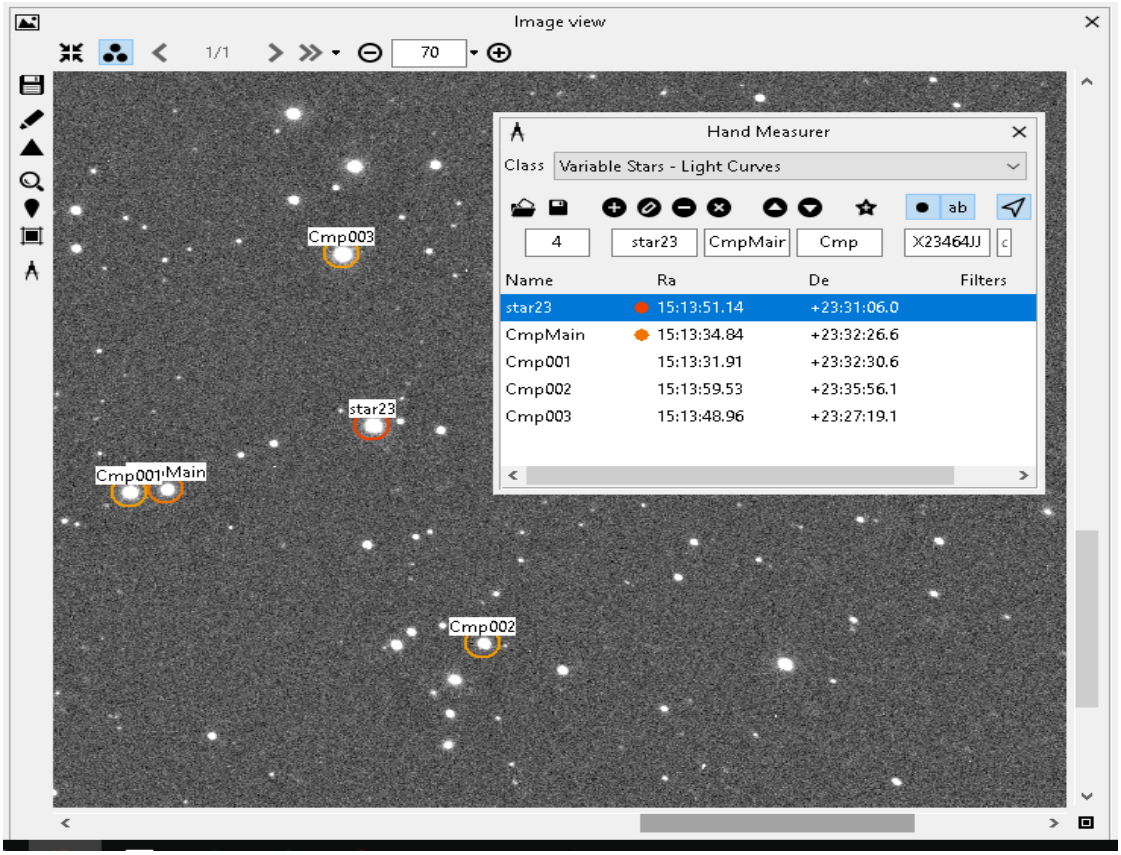


Рис. 8.10.46. Список зір порівняння

Харківська астрономічна обсерваторія-серія 8 (65 кадрів, телескоп АЗТ-8, апертура 700мм, фокусна відстань 2800мм, розмір кадра 1056x1027, розмір пікселя 0.013мм, кутовий розмір пікселя 0.94’’/pix, фільтр R).

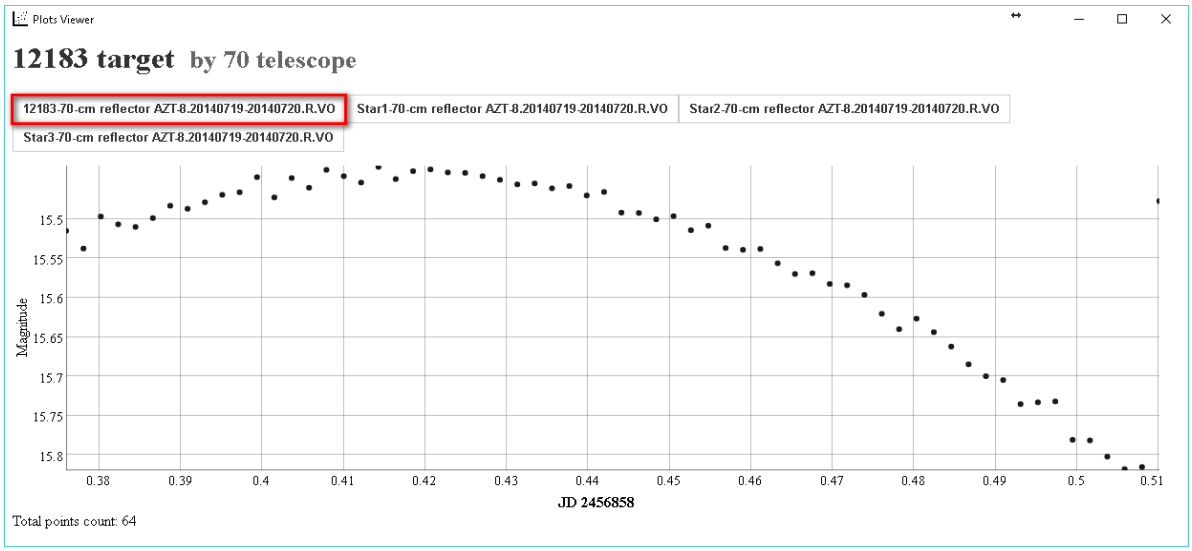


Рис. 8.10.47. Змінна зоря «12183»

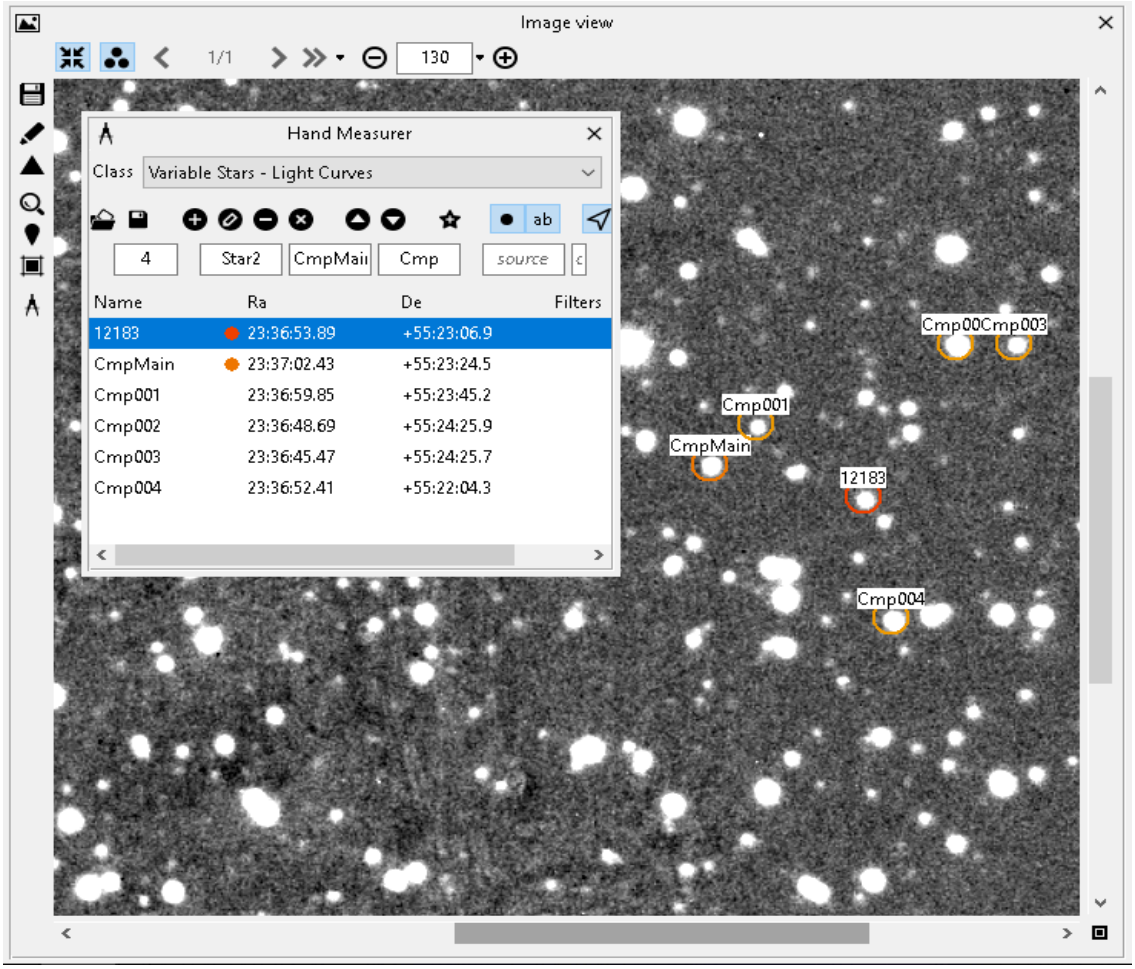


Рис. 8.10.48. Список зір порівняння

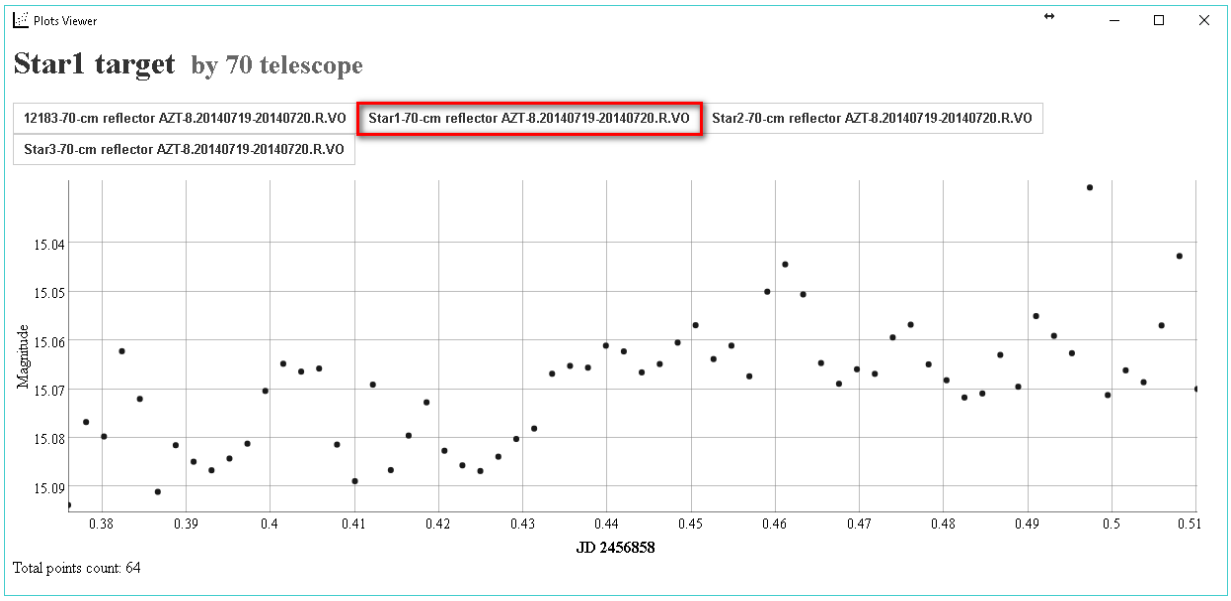


Рис. 8.10.49. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 15.07, СКВ оцінки 0.01223)

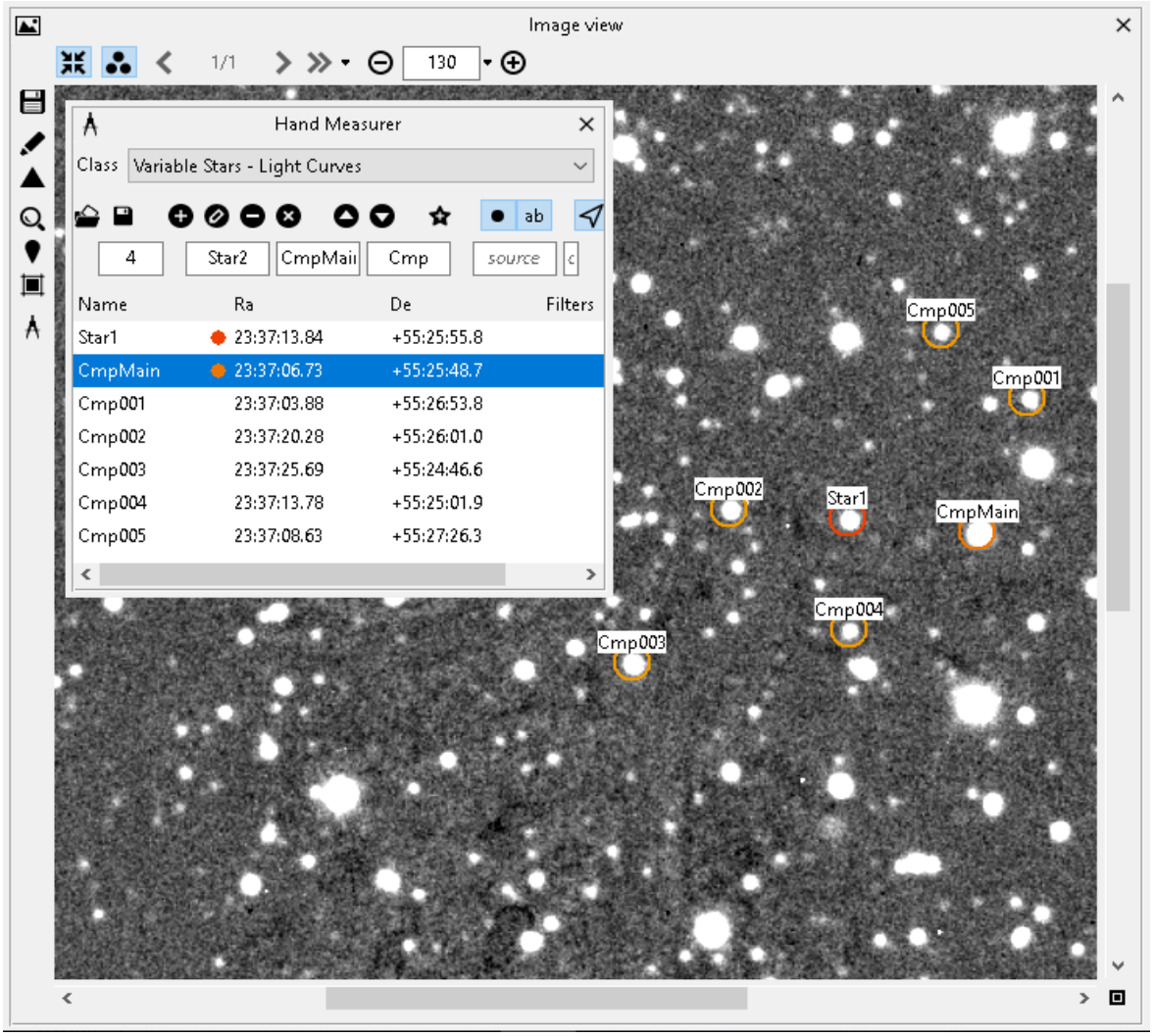


Рис. 8.10.50. Список зір порівняння

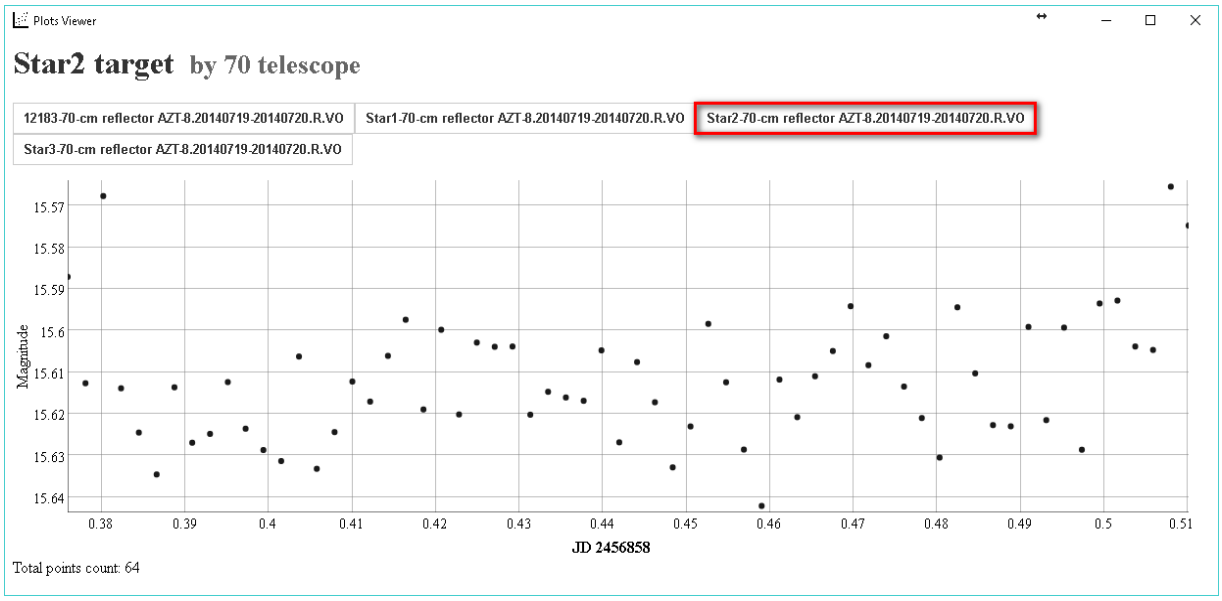


Рис. 8.10.51. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 15.61, СКВ оцінки 0.01522)

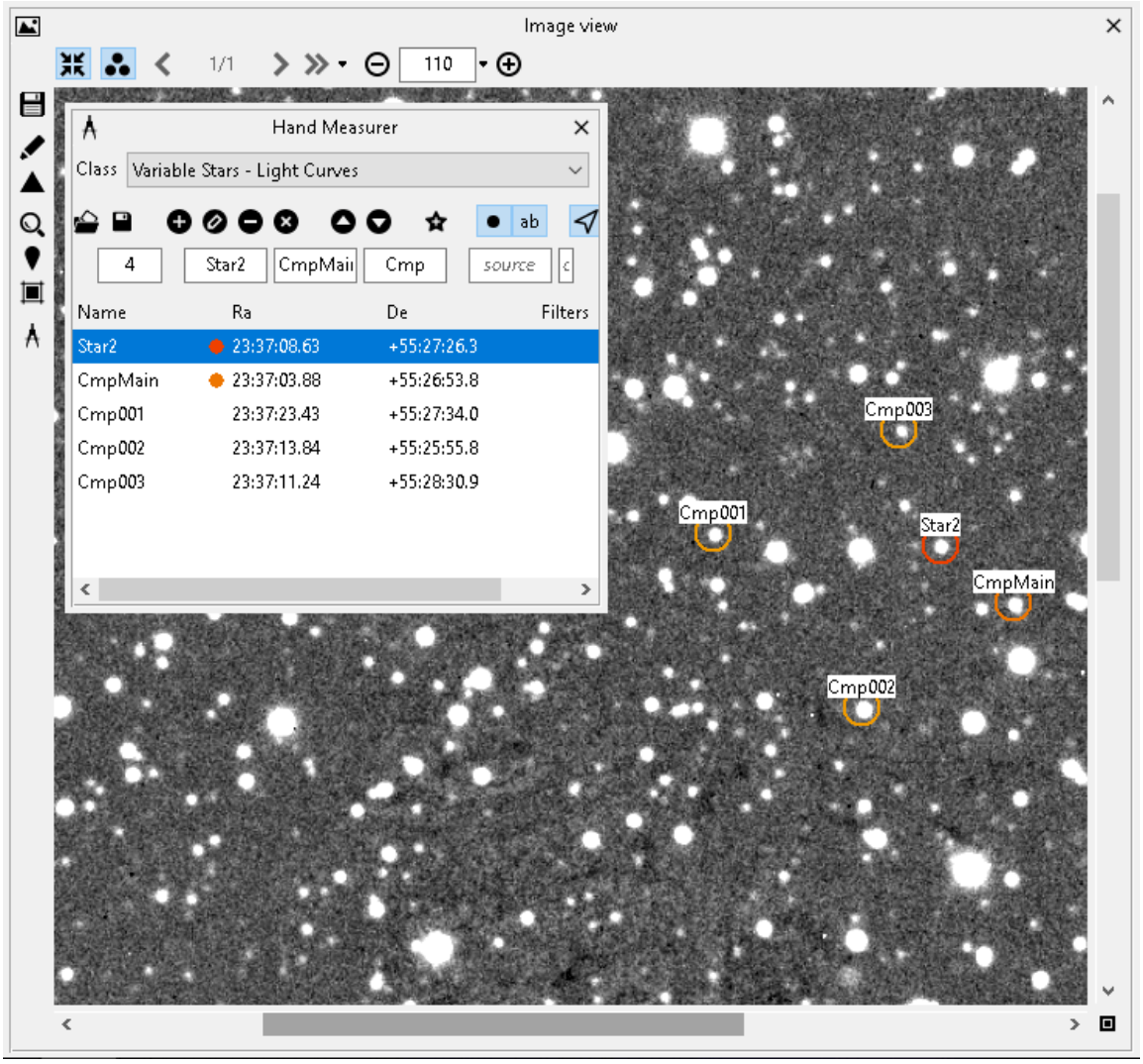


Рис. 8.10.52. Список зір порівняння

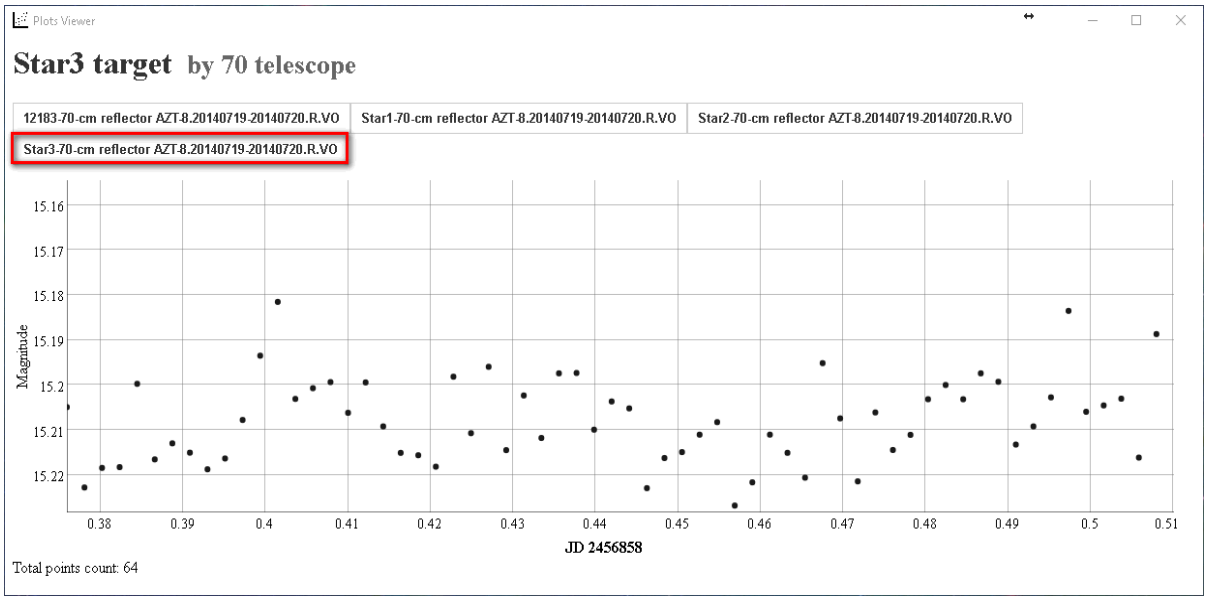


Рис. 8.10.53. Постійна зоря «№3» (середнє значення оцінки 15.20, СКВ оцінки 0.03376)

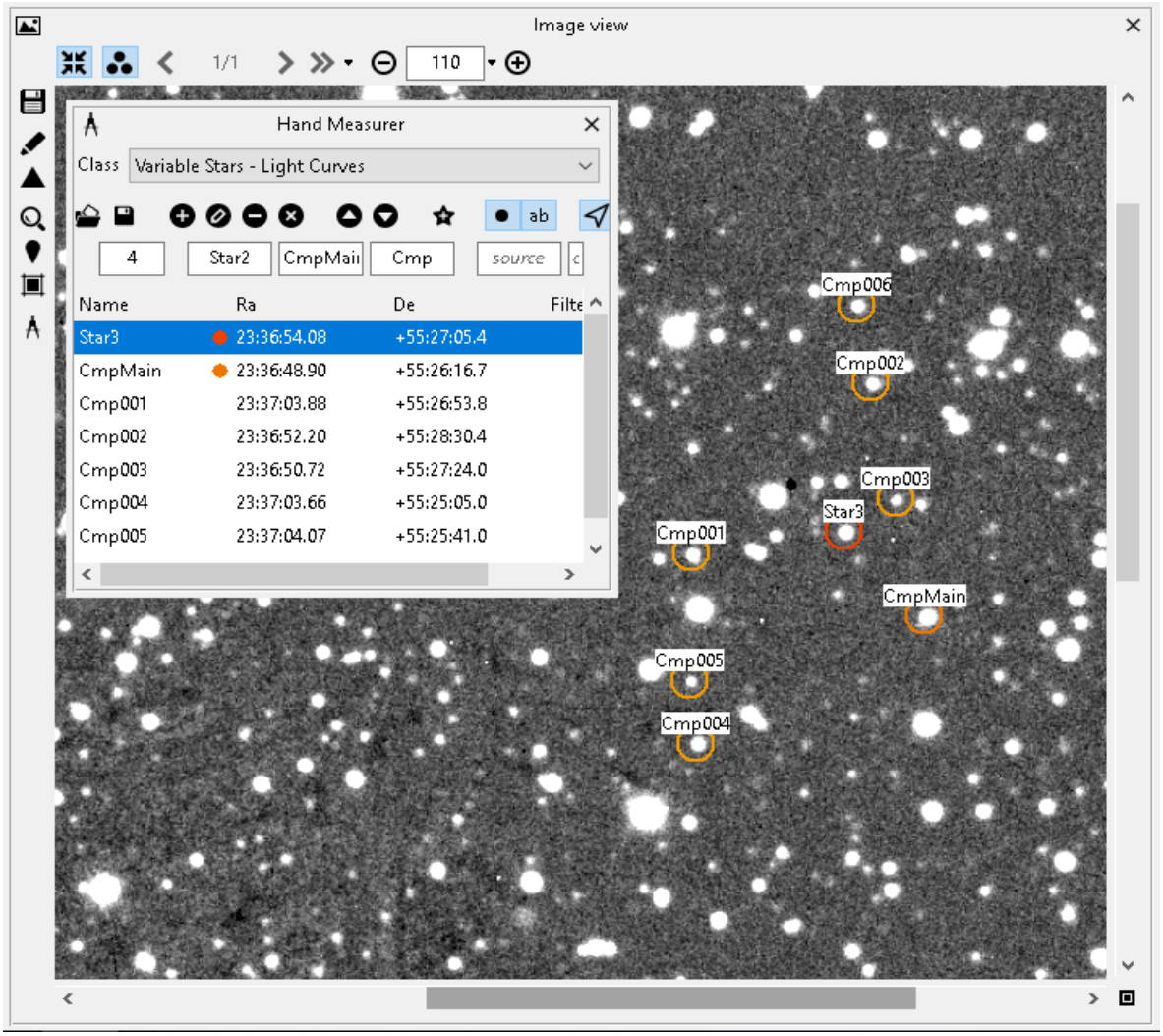


Рис. 8.10.54. Список зір порівняння

Харківська астрономічна обсерваторія -серія 9 (66 кадрів, телескоп АЗТ-8, апертура 700мм, фокусна відстань 2800мм, розмір кадра 1056x1027, розмір пікселя 0.013мм, кутовий розмір пікселя 0.94’’/pix, фільтр R).

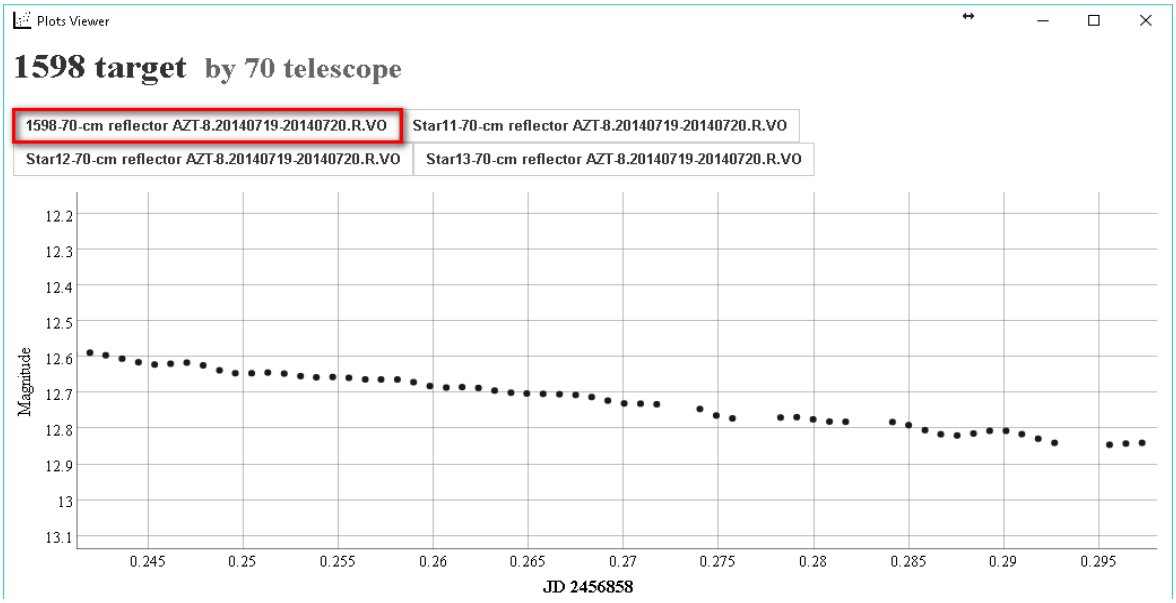


Рис. 8.10.55. Змінна зоря «1598»

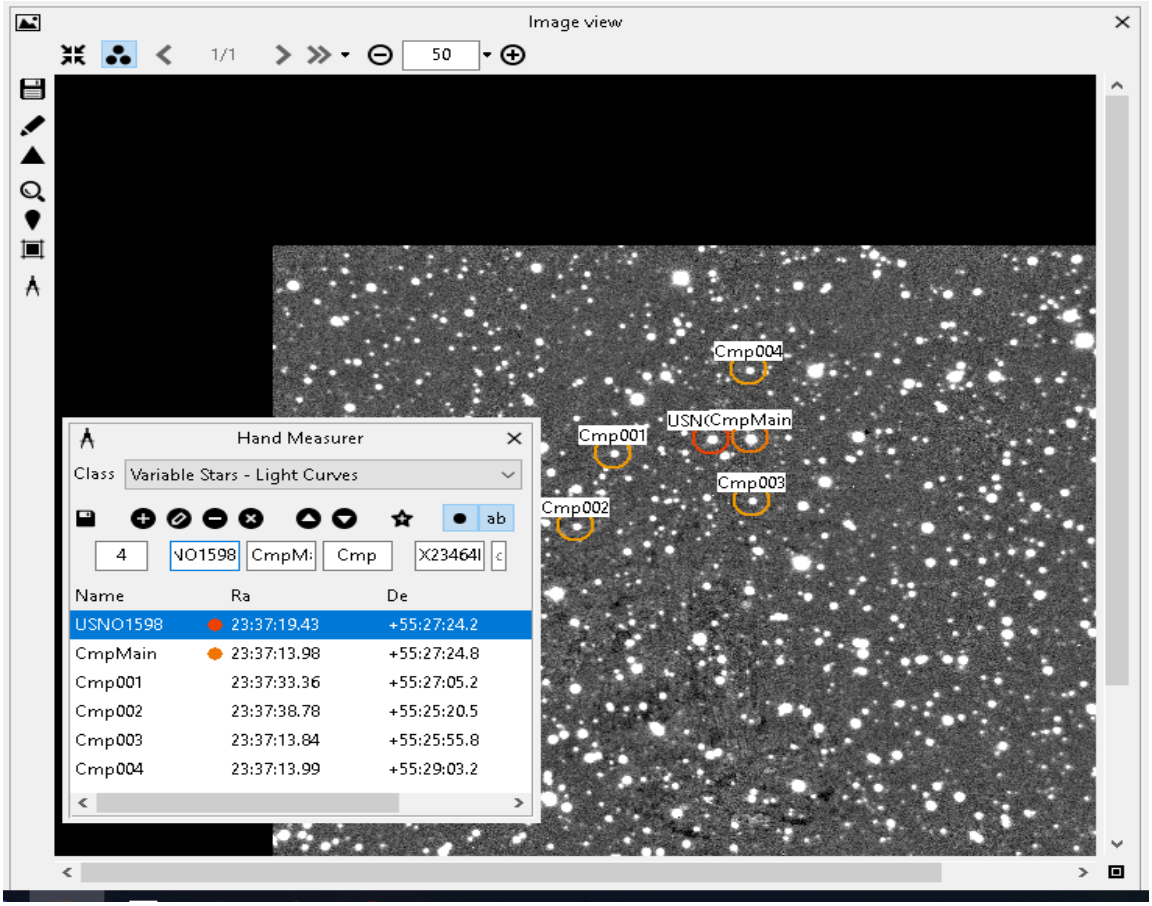


Рис. 8.10.56. Список зір порівняння

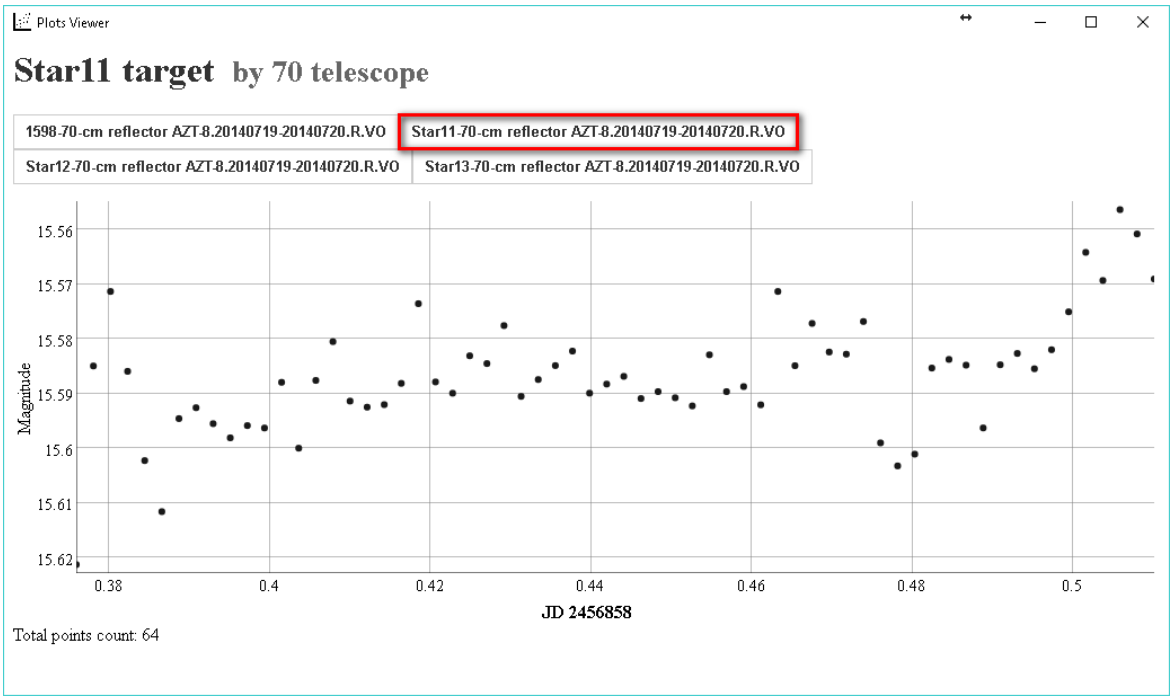


Рис. 8.10.57. Постійна зоря «№1» (середнє значення оцінки 15.59, СКВ оцінки 0.01092)

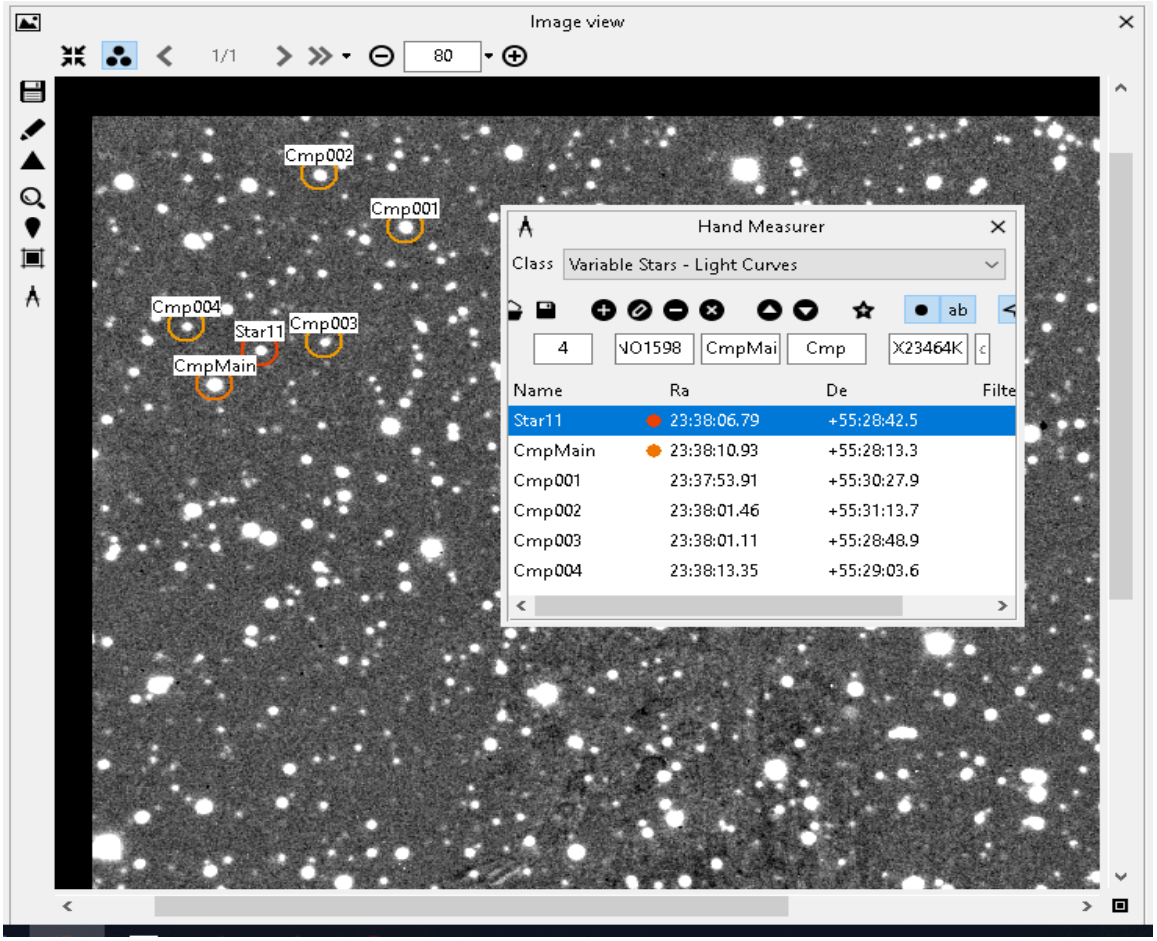


Рис. 8.10.58. Список зір порівняння

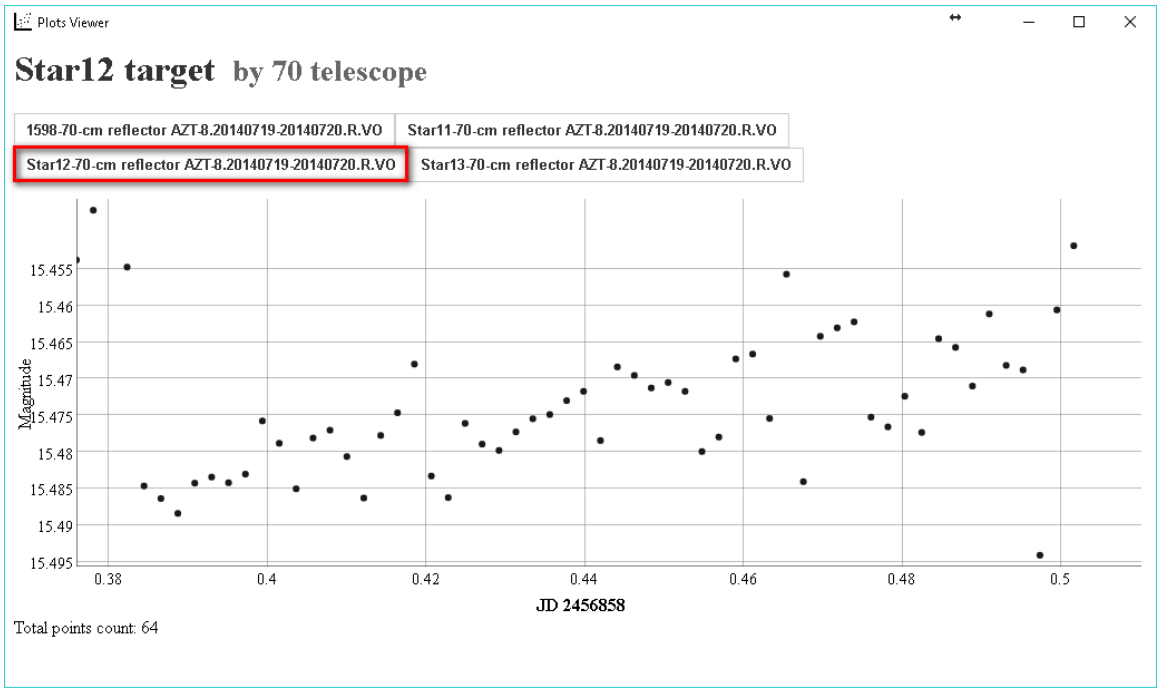


Рис. 8.10.59. Постійна зоря «№2» (середнє значення оцінки 15.47, СКВ оцінки 0.02697)

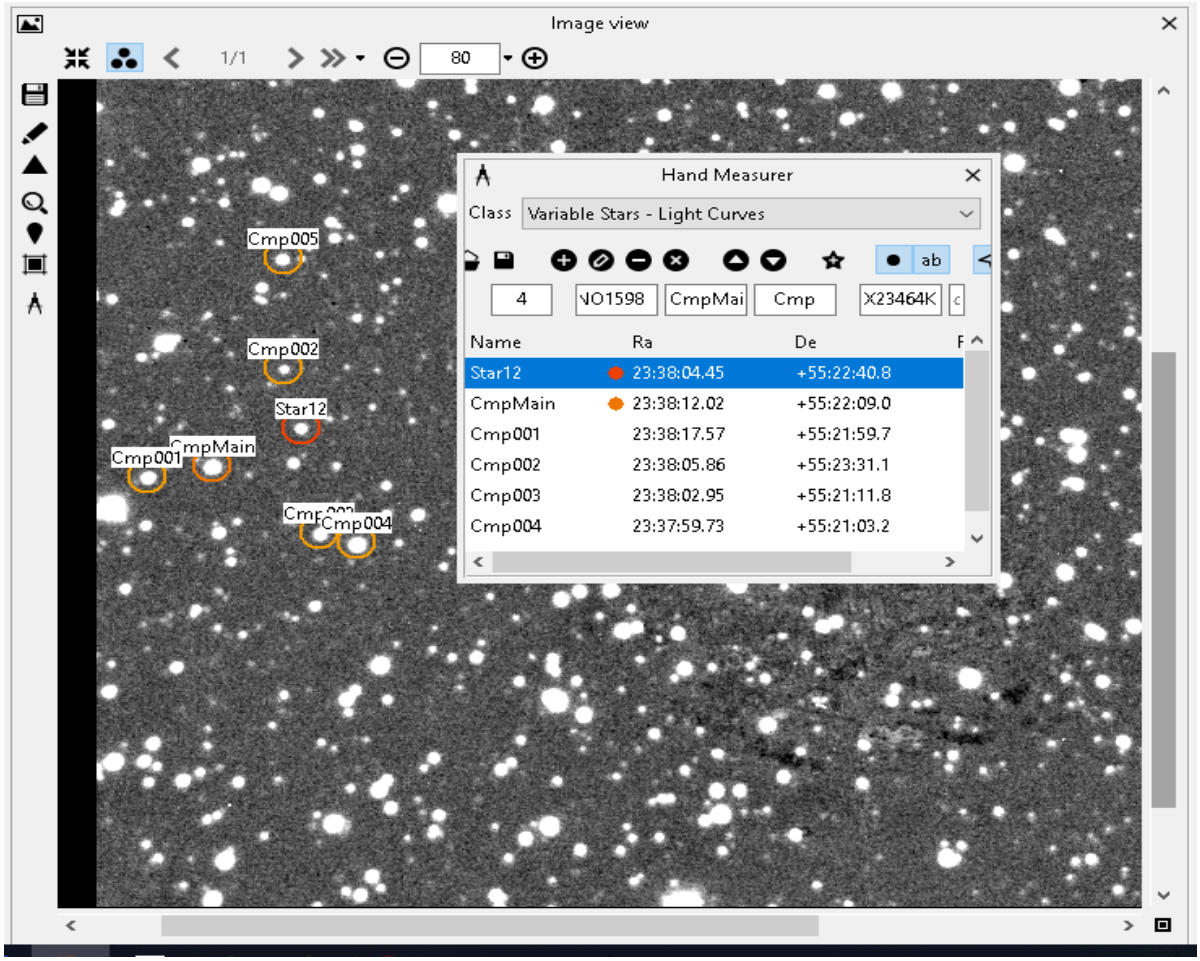


Рис. 8.10.60. Список зір порівняння

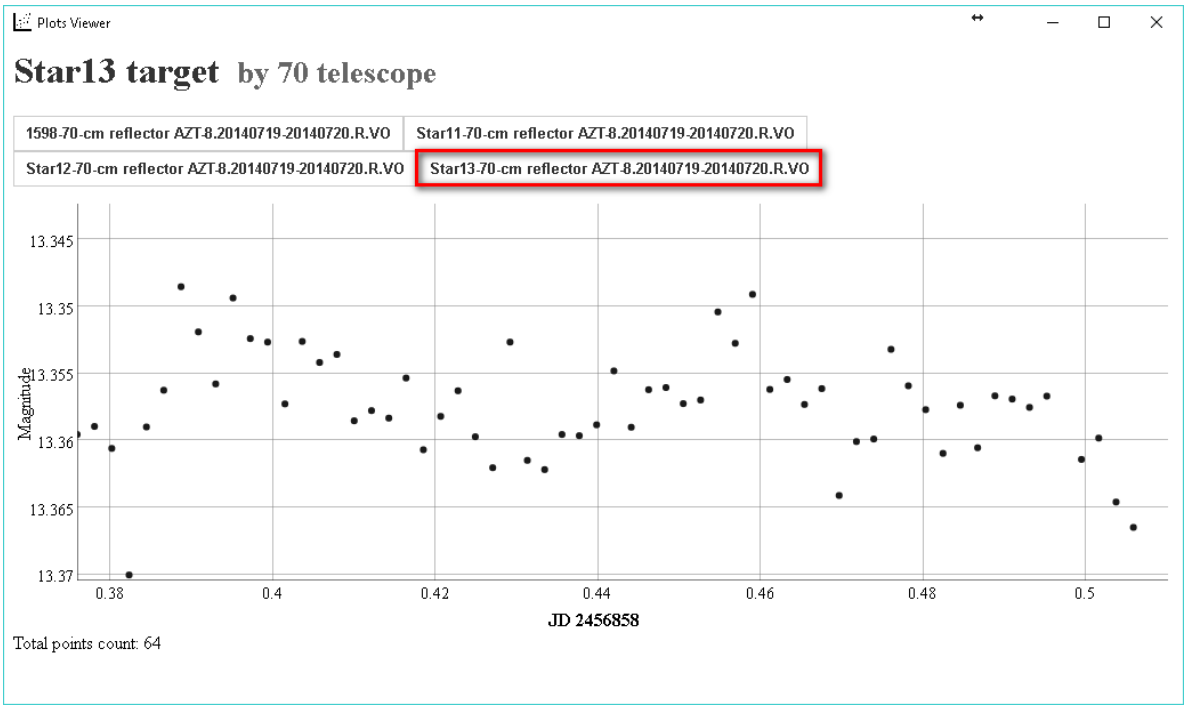


Рис. 8.10.61. Постійна зоря «№3» (середнє значення оцінки 13.36, СКВ оцінки 0.00910)

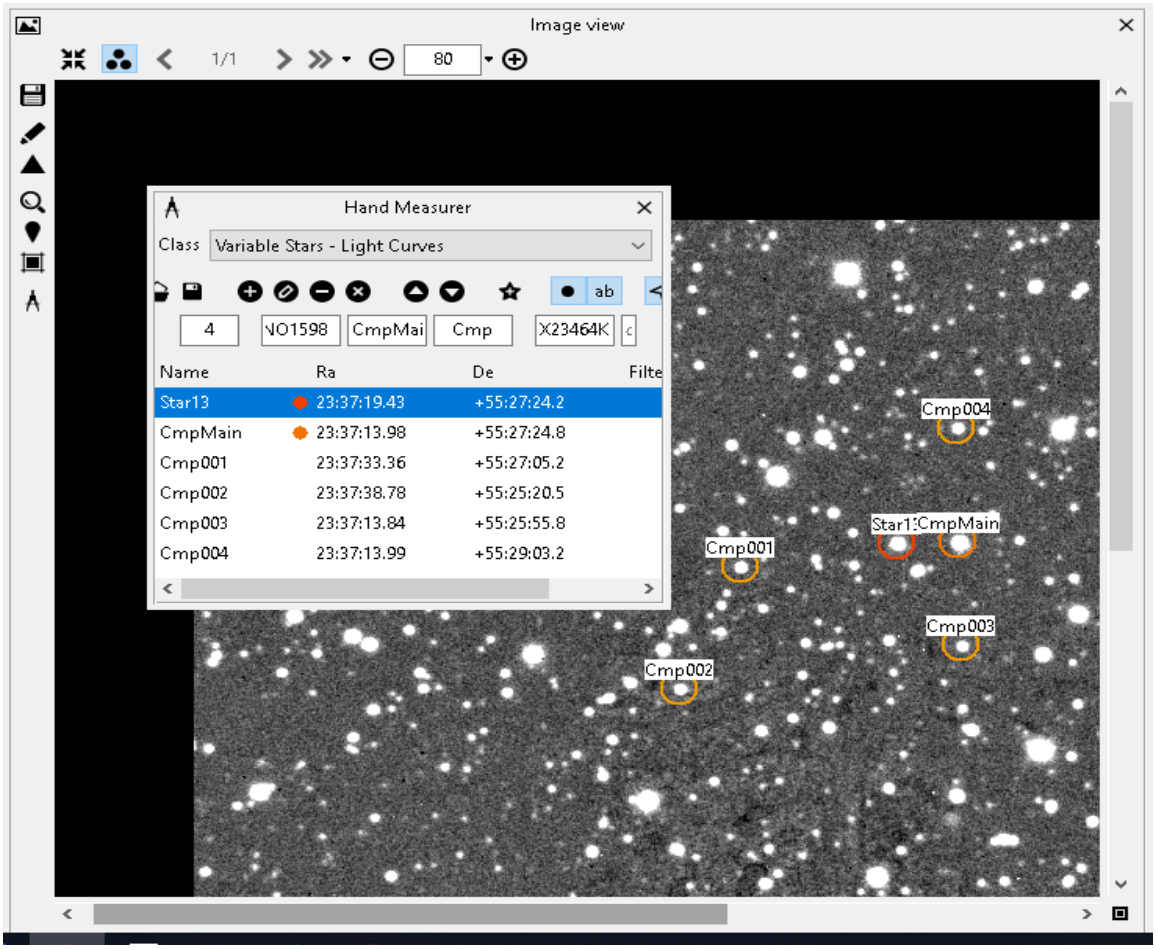


Рис. 8.10.62. Список зір порівняння

ВИСНОВКИ

Розробка програмного забезпечення навколоземної астрономії та контролю космічного простору – одна з визначальних умов для їх сталого розвитку. Пов'язано це з тим, що кількість задач росте, їх якість, умови вирішення та кінцева мета постійно змінюються. Крім того, в деяких проектах постійно зростають вимоги до оперативності вирішення задач.

Наукове ПМЗ є формалізованим досвідом вчених, замовників та розробників ПМЗ. Даний формалізований досвід може бути використаний усіма.

ПМЗ у галузі навколоземної астрономії та ККП має свої особливості.

Воно є наукомістке, тобто його складність значно перевищує складність його коду. Розробка такого ПЗ не можлива без залучення фахівців (прикладні математики, обчислювальні програмісти). В астрономічних дослідженнях та ККП мають місце великі обсяги даних (big data), що вимагає при розробці ПМЗ використовувати передові досягнення інформаційних технологій та залучення IT– фахівців.

ПМЗ э ефективним лише тоді, коли враховує майже всі особливості процесу формування даних, які підлягають обробці, та враховує мету їх обробки. Врахування зазначених особливостей не можливе без залучення фахівців у галузі використання ПМЗ.

Рівень сучасних досліджень визначається рівнем засобів та методик вимірювань, а також рівнем обробки цих вимірювань. Обробка вимірювань виконується програмним забезпеченням, яке реалізує відповідні обчислювальні методи. Таким чином, рівень ПМЗ та рівень закладених в нього обчислювальних методів (разом з рівнем засобів та методик вимірювань) визначає рівень досліджень.

Тепер розробка обчислювальних методів та ПМЗ поступилися місцем їх модернізації. Створення ефективних засобів обробки спостережень є результатом багаторічної плідної праці сталих колективів астрономів-

математиків-програмістів. Щороку для старих та нових галузей, а також умов використання враховуються нові особливості, покращуються окремі компоненти.

Сучасні дослідження в галузі контролю космічного простору та навколоземної астрономії глобалізовані, як і світ загалом. Потрібно інтегруватись у сучасний світ контролю космічного простору як у межах України (об’єднання зусиль галузей, організацій, груп) так і поза ними. Це має бути на противагу стратегії «фортеця в облозі», що майже завжди означає «ми не візьмемо у Вас Ваше ПМЗ і не дамо Вам наші вимірювання».

Таким чином, час коли астрономи самі для себе розробляють кожний раз з нуля програмне забезпечення спливає. Необхідне створення окремих підрозділів та навіть організації, яка спеціалізуються на дослідженнях та розробках обчислювальних методів та програмного забезпечення обробки спостережень. У сучасному світі такий підхід вже реалізований.

При виконанні роботи були модернізовані обчислювальні методи сегментації зображень штучних супутників Землі та малих тіл Сонячної системи на астрономічних ПЗЗ-кадрах; розрахунку апертурної яскравості зображень небесних об’єктів на ПЗЗ кадрах; оцінки блиску небесних об’єктів на кадрах серії; виділення зображень об'єктів, змазаних власним рухом.

У якості наукової новизни отриманих результатів перш за все необхідно відзначити.

1. Розроблений метод сегментації зображень враховує основні особливості подібних зображень як об'єктів сегментації, таких як: наявність надмірних сегментів, виділених із стартовими пікселями в аномальних піках; перетин із зображеннями близьких об'єктів.

2. Попередня обробка цифрового кадру з використанням згладжуючого цифрового фільтру низьких частот, що дозволило зменшити кількість неправдивих піків, які виділяються на зображеннях яскравих зірок.

3. Прийняття рішення про тип сегменту, який виділяється на зображенні яскравої зірки, що дозволило з одного боку, виділити зображення поодиноких

об'єктів, сформованих джерелами випромінювання, а з іншої - розформувати надмірні сегменти, виділені з стартовими пікселями в неправдивих пиках і розподілити їх пікселі між іншими сегментами, зокрема сегментом, який відповідає зображенню яскравої зорі.

4. Виділення протяжних зображень компактних тільки в сегментах, які заздалегідь виділені з використанням обчислювального методу сегментації поодиноких об'єктів та містять більше ніж стартовий піксель, що дозволило провести сегментацію зображень протяжних об'єктів з обчислювальними витратами, близькими до мінімальних.

5. Використання відношення між кількістю пікселів, віднесених до зображення компактної групи та витягнутого зображення і оцінки витягнутості сегментованого зображення для ухвалення рішення про виділення витягнутого зображення, що дозволило проводити сегментацію витягнутого зображень на цифровому зображенні усіх типів зображень об'єктів (поодиноких, компактної групи, витягнутих).

6. Попереднє визначення кількості зображень об'єктів, які входять в зображення компактної групи, що дозволило вирішувати задачу розділення початкового зображення компактної групи об'єктів на зображення об'єктів цієї групи в умовах відомої кількості об'єктів.

7. Використання властивостей надпіксельної моделі Гауса, що дозволило здійснити розділення зображення компактної групи об'єктів на зображення об'єктів даної групи.

Було також створено ПМЗ сервісу, обробки та зберігання ПЗЗ-кадрів та даних їх обробки.

Значна увага була приділена тестуванню та впровадженню програмно-математичного забезпечення CoLiTecAs для автоматичної обробки кадрів та автоматизованого пошуку малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗС-кадрів, а також ПМЗ CoLiTecSat ручного виявлення та автоматичної оцінки положення ШСЗ на серіях ПЗС-кадрів і ПМЗ CoLiTecVS автоматичної побудови кривих блиску змінних зір.

До тестування та впровадження були залучені вітчизняні фахівці НДІ «Одеська астрономічна обсерваторія», НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Лабораторія космічних досліджень ДВНЗ «УжНУ», Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля. Також залучались іноземні фахівці, які працюють у Словаччині, Таїланді, Казахстані.

Було відзначено багато переваг програмного забезпечення, яке тестувалось. Відзначено, что ПМЗ CoLiTec є безперечно конкурентно-спроможною національної розробкою у галузі дослідження ШСЗ, тіл Сонячної системи, змінних зір поряд з передовими світовими продуктами.

До переваг слід віднести перш за все такі:

– повна автоматизація процесу обробки спостережень;

– декілька режимів виділення рухомих об’єктів на кадрах;

– наявність достатньої кількості сучасних опорних зоряних каталогів;

– точність координат об’єктів на рівні світових астрономічних ПМЗ;

– можливість детального налаштування параметрів обробки з урахуванням специфіки спостережень, телескопа та камери.

Дослідники відзначили високу точність позиційних вимірювань ПМЗ CoLiTecAS та CoLiTecSAT. Точність вимірювань CoLiTecAS співставна за точністю вимірювань з ПМЗ Astrometrica. У свою чергу, точність вимірювань CoLiTecSAT співставна за точністю вимірювань з ПМЗ Apex II.

Використання програми обробки зображень CoLiTecSAT разом з телескопом Verbizkyi за певних умов спостережень потенційно забезпечують найкращий рівень випадкової помилки одного вимірювання для низькоорбітальних об'єктів серед усіх телескопів, які надають свої спостереження в мережу УМОС.

На слабких об'єктах CoLiTec однозначно краща від всіх існуючих ПМЗ за показниками точності та за зручністю вимірювання.

Окремим плюсом CoLiTec є можливість підключати APASS-DR9 для диференційної фотометрії.

Серед виявлених під час тестування та дослідження недоліків перш за все слід відзначити наступні.

1. Великий час обрахунку, який в 3 рази більший за час обрахунку з використанням Apex II.

2. Відсутність автоматичного виявлення в сателітному проекті.

3. Не досконала фотометрія ШСЗ без добового ведення, а в більш загальному випадку – якщо зорі і ШСЗ мають різну модель зображення (об’єкти – точки, зорі – штрихи, або навпаки).

4. Переплутування вимірювань при роботі автопілота.

5. Великий відсоток критичних помилок.

6. Неефективна робота програм на 64-бітних системах.

7. Програма не працює при наявності в шляхах символів національних алфавітів.

8. Складність GUI верхніх шарів програми.

9. Періодично має місце некоректне завершення роботи програми.

10. Погана точність позиційних вимірювань при кадрах, які спотворені під час збоїв ведення монтуванням.

Зазначені недоліки не впливають на позитивне враження від ПМЗ CoLiTec, яке досліджувалось.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Науковий проект № 404-Кт «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколоземної астрономії» викликав значний інтерес серед астрономічних організацій України та світу, які спостерігають ШСЗ, пошуком та дослідженням астероїдів, а також фотометричними дослідженнями змінних зір.

Дослідження та розробки, які рекомендовані дослідникам та розробникам ПМЗ CoLiTec наведені в таблиці.

Таблиця недоліків, та рекомендацій, що до їх усунення.

№	Недолік	Варіанти вирішення
1.	Великий час обдрахунку, який в 3 рази більший ніж у Apex II	1. Робота програми на локальній мережі. Експеримент, усунення помилок. 2. Перехід на GPU, переписування критичних місць на CUDA. 3. Оптимізація процедури сегментації з метою мінімізації виділення та дублювання пам'яті і інших питань організації обчислень.
2.	Відсутність автоматичного виявлення в сателітному проекті	1. Короткий шлях. Бланкування штрихів, які відповідають зорям та виявлення зображень точкових об'єктів поза штрихами. (невисока якість автоматичного виявлення) 2. Довгий шлях. Виявлення штрихів після СФ, відновлення зображення штрихів та їх видалення з вихідного зображення. Далі - виявлення на зображенні точкових джерел. 3.У будь-якому випадку після варіантів 1 або 2 виконується перетворення Хока. 4. Впровадження в проект процедур небесної механіки
3.	Фотометрія ШСЗ без добового ведення, а в більш загальному випадку – якщо зорі і ШСЗ мають різну модель зображення (об'єкт точки, зорі	Створення фітингу з нормуванням для зображень, які аналітично не задаються, двомодельний фітинг близьких зображень і суміжне.

	штрихи, або навпаки)	
4.	Переплутування вимірювань при роботі автопілота	А. Візуалізація допустимих вимірювань об'єкта на кадрі. Б. Формування усіх допустимих вимірювань до початку роботи автопілота в широкому стробі або на усьому кадрі.
5.	Великий відсоток критичних помилок	А. Формування усіх допустимих вимірювань до початку роботи автопілота в широкому стробі або на усьому кадрі. Б. Розробка GUI для видалення окремих вимірювань об'єкта на серії CCD- кадрів В. Проведення подальших досліджень.
6.	Неефективна робота програм на 64-бітних системах	Адаптація, компіляція та тестування модулів для 64 бітної архітектури ОС
7.	Програма не працює при наявності в шляхах символів національних алфавітів	Інкапсуляція в проект UNICODE
8.	Складність GUI верхніх шарів програми	А. Спрощення GUI верхніх шарів. Підготовка спрощеної документації. Б. Покращення змісту повідомлень, які видаються
9.	Періодично має місце некоректне завершення роботи програми	Модернізація, тестування і більш глибоке впровадження механізмів обробки виняткових ситуацій
10.	Погана точність позиційних вимірювань при кадрах, які спотворені під час збоїв ведення монтуванням	Впровадження фітинга з профілем, який аналітично не задається. Відпрацювання на кругових, витягнутих та "трикутних" зображеннях

Крім зазначеного в таблиці було б доцільно врахувати наступні пропозиції. ПМЗ CoLiTecSAT повинно мати міжтелескопну складову, а саме прогноз руху ШСЗ, первісне визначення та уточнення елементів орбіт за рахунок сформованих та отриманих ззовні вимірювань. Доцільна розробка ПМЗ CoLiTecSATVS автоматичної побудови кривих блиску ШСЗ за даними сукупності CCD-кадрів, яке враховує основні особливості фотометрії супутників. Доцільна реалізація мультиформатного режиму роботи CoLiTecSAT, при якому будуть оброблятись данні у форматах avi та інших.

Доцільно створення ПМЗ масової фотометрії всіх зір серії кадрів.

Зазначені недоліки та пропозиції свідчать як про інтерес до ПМЗ, так і про необхідність доопрацювання зазначеної вітчизняної розробки з відповідним фінансуванням з боку держави Україна. Наявність актів та відгуків про впровадження ПМЗ CoLiTec з астрономічних обсерваторій України та Словаччини, Таїланду, Казахстану свідчать про можливість покращення ефективності роботи астрономів будь якої обсерваторії світу за рахунок впровадження зазначеного ПМЗ у якості інструмента астрономічних наукових досліджень.

Доцільність фінансування подальших розробок програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) автоматичної обробки кадрів та автоматизованого пошуку малих тіл Сонячної системи на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTecAs, ПМЗ мануального виявлення та автоматичної оцінки положення ШСЗ на серіях ПЗЗ-кадрів CoLiTecSat, ПМЗ побудови кривих блиску змінних зір CoLiTecVS також ґрунтується на важливості вказаних розробок в інтересах безпеки та оборони України.

9 НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ФАЗОВОЇ СИСТЕМИ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ (БФСТВ)

Розглянуто принципи побудови і функціонування високоточної багатопозиційною фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ) для тестування і відпрацювання автономних систем управління перспективних високодинамічних пілотованих і безпілотних літальних апаратів, виробів ракетних комплексів, а також для траєкторних вимірювань і навігації космічних апаратів (КА) на стадіях їх виведення, координатно-часового супроводу і управління рухом, стикування КА практично а всіх навколоземних орбітах на висотах до 36 тис. км. Описано завдання і функції МФСТІ, сформульовані попередні вимоги до точності траєкторних визначень. Запропоновано способи експериментального підтвердження досягнення очікуваних точносних і функціональних характеристик і характеристик точності системи в ході її розробки.

9.1 Принципи побудови та функціонування БФСТВ. Склад БФСТВ. Реалізація системи на основі поєднання принципів побудови багатопозиційних фазометричних систем і сучасних ГНСС-технологій точного позиціонування

9.1.1 В основу проекту створення та розвитку системи високоточних вимірювань покладені ідеї, які напрацьовувалися протягом останніх 15 років. Дослідження були спрямовані на створення нових ефективних інформаційно-вимірювальних систем, методів і алгоритмів, математичного та програмного забезпечення координатно-часових визначень, позиціонування надвисокої точності з використанням як сигналів ГНСС, так і інших джерел

випромінювання радіосигналів і централізованої обробки спостережень наземних перманентних референцних ГНСС-станцій , рухомих і стаціонарних об'єктів. На даному етапі досліджені нові вітчизняні технології точного позиціонування (на сантиметровому рівні точності) і їх окремі складові (моделювання та оцінка іоносферних і тропосферних затримок радіосигналів, високотехнологічна обробка фазових ГНСС-спостережень, включаючи дозвіл фазової неоднозначності (РФН) на великих базових відстанях (~1,0 тис. км), усунення фазових стрибків та ін.). Ці напрацювання використовуються в пошуку і вирішенні актуальних прикладних проблем, пов'язаних з подальшим розвитком космічних систем і технологій України, а саме з питаннями щодо забезпечення точних вимірювань параметрів руху високодинамічних об'єктів.

На основі аналізу даного напрямку досліджень, актуальності, проблематики та поточного стану розвитку високоточних засобів траєкторних вимірювань, сучасних світових досягнень у цій сфері, а також на основі наявного доробку авторів даного проекту в області ГНСС-технологій точного позиціонування, сформульовано нову концепцію побудови і функціонування високоточної системи траєкторних вимірювань, що служить для відпрацювання автономних (інерційних і ін.) систем управління і здійснення навігації космічних їх апаратів (КА), що рухаються на висотах до 36 тис. км, а також інших високодинамічних пілотованих і безпілотних літальних апаратів (ЛА) різного призначення при їх польоті в навколоземному просторі.

9.1.2 Для вирішення завдання створення багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ) з максимально можливими точнісними характеристиками запропоновано нову концепцію побудови і функціонування системи траєкторних вимірювань [109–111], засновану на вимірюванні необхідної сукупності параметрів за допомогою розподіленого в просторі радіотехнічного комплексу, що складається з рухомого бортового сегмента контрольованих об'єктів (КО) і наземного сегмента, які утворюють єдину вимірювальну систему. Рухомий бортовий сегмент КО – бортовий

прийомо-передавач/ретранслятор вирішує завдання прийому широкосмугових ГНСС-подібних тричастотних радіосигналів, що передаються наземним передавачем, їх перетворення і випромінення (з відомим зміщенням частот для виключення інтерференції) в дециметровому діапазоні хвиль в напрямку мережі наземних універсальних модифікованих приймачів сигналів ВДЛА і сигналів ГНСС, що утворюють багатопозиційний інтерферометр. Одна з найважливіших особливостей підходу до створення БФСТВ полягає в досягненні надійного розрізнення фазової невизначеності різниць фазових спостережень наземних приймачів сигналів високодинамічних КО і одночасно сигналів ГНСС. В такому випадку похибки оцінювання напрямних косинусів КО (аналогів вимірювань кутів – азимута і кута місця) будуть відповідати заданим характеристикам на максимальних віддаленнях КО від вимірювальних пунктів системи. Таке завдання є новим, а підхід до його вирішення базується на використанні розроблених авторами проекту нових методів і ідей, які пройшли апробацію в ході попередніх досліджень.

Концепція побудови БФСТВ полягає в спільному використанні: 1) принципів побудови і функціонування полігонних багатопозиційних фазометричних систем типу MISTRAM, AZUSA (США), ВЕГА (СРСР); 2) сигналів і технологій ГНСС (модифікованих апаратних і програмно-математичних рішень), а також технологій типу EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) – регіональних широкозонних диференціальних підсистем ГНСС. Концепцію побудови і функціонування БФСТВ визначення параметрів руху ВДЛА і КА відображає рис. 9.1. При певних розбіжностях у реалізації обидва варіанти БФСТВ (для тестування ВДЛА і для визначення траєкторій КА) базуються на одних і тих же принципах побудови і функціонування.

Система, що розробляється, включає в себе наземний сегмент і бортовий прийомо-передавач /ретранслятор ГНСС-подібних складних фазо-маніпульованих сигналів на трьох рознесених (на ~ 70, ~ 350, ~ 420 МГц)

несучих частотах в дециметровому діапазоні хвиль (~ 1,7-2,1 ГГц) – див. рис. 9.2. Наземний сегмент включає в себе:

а) прийомо-передавач (1) вимірювальних ГНСС-подібних сигналів (по типу EGNOS) – дальномерний тракт;

б) бортову апаратуру (2);

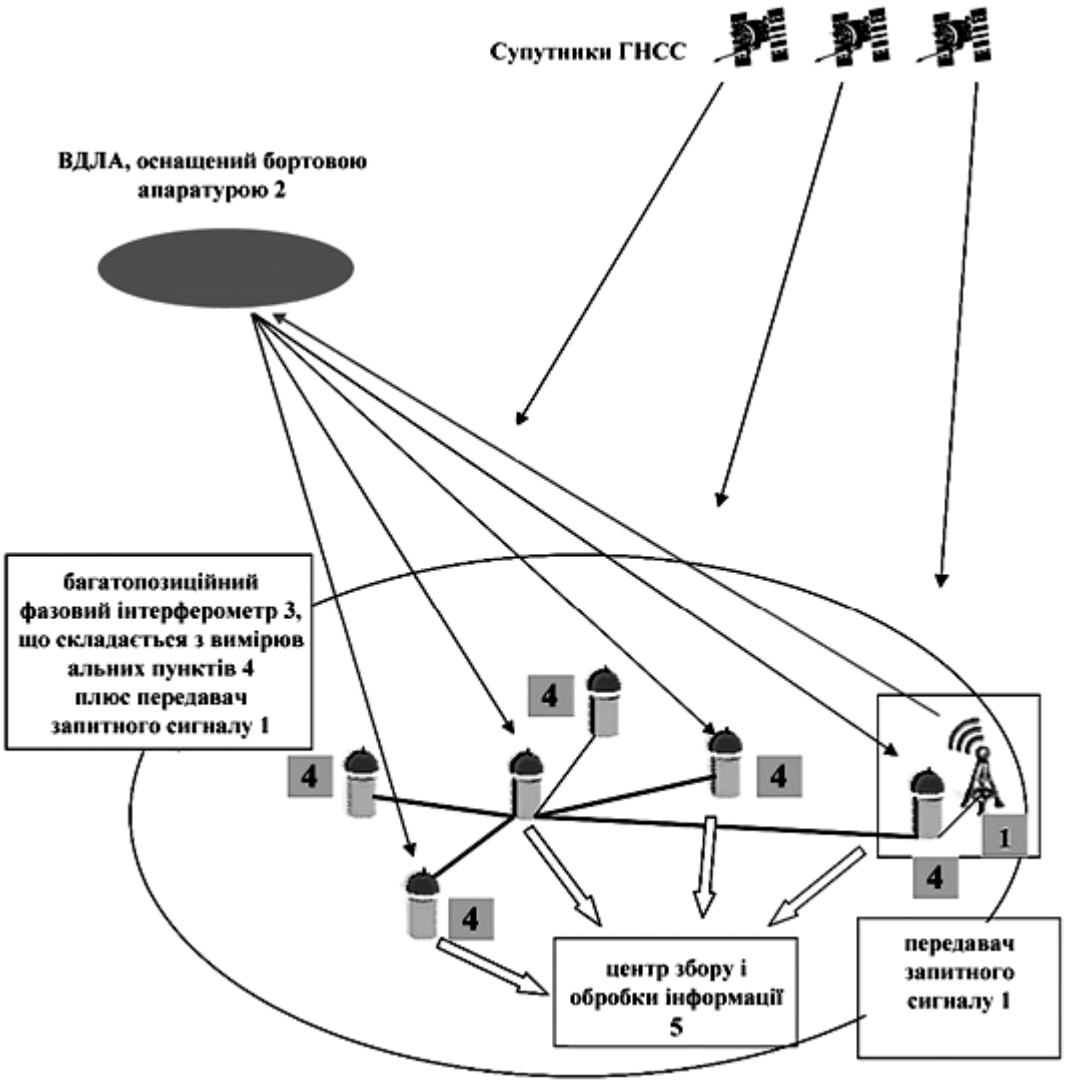


Рис. 9.1 – Побудова БФСТВ для визначення параметрів траєкторій ВДЛА і КА

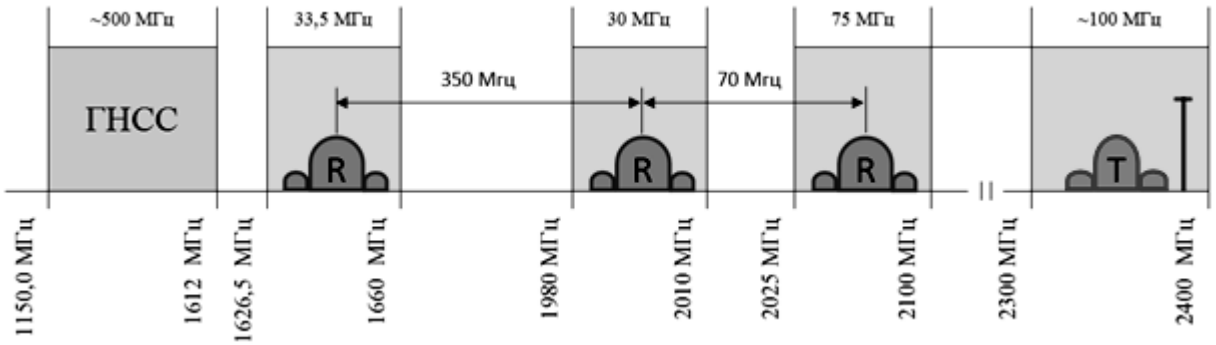


Рис. 9.2 – Попередній частотний план* БФСТВ

*Частотний план БФСТВ потребує узгодження з Міжнародним Союзом Електрозв'язку і в ході узгодження план може бути перевизначений

в) багатопозиційний фазовий интерферометр (3) – рознесені багатоканальні спеціалізовані станції, які приймають і обробляють одночасно сигнали ГНСС (для високоточної координатної прив'язки фазових центрів приймальних антен і прецизійної синхронізації шкал часу приймачів) і сигнали, що ретранслюються бортовими прийомо-передавачами КО (4);

г) підсистему збору і обробки спостережень БФСТВ (5).

Геометричними аналогами вимірюваних БФСТВ параметрів сигналів КО (поточними навігаційними параметрами) є кодові спостереження петльових псевдовідстаней (на трасах «наземний передавач – КО – станції БФСТВ»), фазові спостереження різниць псевдовідстаней (на трасах «КО – рознесені в просторі станції інтерферометра БФСТВ»), а також швидкості зміни зазначених лінійних комбінацій псевдовідстаней (за доплерівськими і фазовими спостереженнями).

Геометричними аналогами вимірюваних БФСТВ параметрів сигналів ГНСС є кодові і фазові спостереження псевдовідстаней (на трасах «ГНСС-супутники – станції БФСТВ»), а також швидкості зміни цих параметрів.

Параметрами, що сумісно оцінюються, є: параметри траєкторій КО (поточні координати і складові вектора швидкості) з їх «прив'язкою» до заданої шкали часу, поточні розбіжності шкал часу рознесених в просторі станцій БФСТВ і швидкості їх зміни, поточні координати фазових центрів приймальних антен станцій (при необхідності – наприклад, для морського варіанту реалізації БФСТВ), параметри тропосферних та іоносферних затримок сигналів на станціях БФСТВ (оцінюються по фазовим ГНСС-спостереженням), параметри фазових невизначеностей.

Основний внесок в оцінювання поточних розбіжностей шкал часу станцій БФСТВ вносять фазові ГНСС-спостереження (з похибками ~ 0,03-0,05 нс), і тому в першому наближенні

(наприклад, для цілей оцінки точності) можна вважати спостереження лінійних комбінацій (сум і різниць) псевдовідстаней спостереженнями сум і різниць відстаней.

Станції прийому сигналів ГНСС і сигналів контрольованих об'єктів мають утворювати інтерферометр (з приблизно перпендикулярними базами) і додаткові, менші за величиною, вимірювальні бази для цілей більш надійного розкриття фазової невизначеності. Максимальні бази інтерферометра між рознесеними приймачами БФСТВ можуть при необхідності досягати ~ 50-100 км при визначенні параметрів траєкторій ВДЛА і ~ 700-1200 км (для території України) при визначенні параметрів траєкторій КА в ближньому і далекому космосі.

Універсальна система, що розглядається, передбачає модульний принцип побудови з можливістю оптимальної реконфігурації системи під конкретні завдання для визначення параметрів руху конкретних ВДЛА (або КА) з можливістю швидкого розгортання і введення в експлуатацію системи в заданому районі. Обмін вимірювальною інформацією між елементами системи і центром збору та обробки для цілей прецизійної координатної прив'язки і синхронізації рознесених прийомних модулів буде здійснюватися з використанням мобільного Інтернет або інших засобів телекомунікації. Слід також наголосити на необхідності калібрування інструментальних затримок у вимірювальних трактах апаратури БФСТВ і зсувів фазових центрів антен, адже у фазометричній системі облік систематичних похибок вимірювань є принципово важливим.

Запропонований принцип побудови системи дозволяє досягти найвищої точності визначення параметрів траєкторії об'єкта, навіть якщо відстані до нього істотно перевищують розміри вимірювальних базисів, за умови, що вимірювання відстані здійснюються з

метровим рівнем точності, а вимірювання напрямних косинусів – з рівнем точності $\sim 10^{-6} \div 10^{-8}$. В цьому випадку похибки визначення поточних координат КА будуть перебувати в межах ~ 0,1 м – 1,0 м при визначенні параметрів руху на віддаленнях від ~ 200 км до ~ 40 тис. км. У випадках, коли розміри вимірювальних базисів БФСТВ будуть сумірні з відстанями до КО, без значущої втрати точності можуть використовуватися тільки високоточні інтерферометричні вимірювання різниць відстаней (без використання кодових вимірювань петльових відстаней). В цьому випадку бортова апаратура КО може працювати в режимі «свистка» без запиту від наземного передавача, що буде відповідати схемі «GPS навпаки».

Наземні приймачі (основа вимірювальних пунктів – ВП-ів) БФСТВ повинні розроблятися з урахуванням одного й того ж принципу/технології одночасного прийому і обробки як сигналів ГНСС, так і сигналів від контрольованих об'єктів. Використання при створенні БФСТВ вже напрацьованих і апробованих ГНСС-технологій як в апаратній частині, так і в частині програмно-математичного забезпечення – це одна з ключових переваг запропонованого принципу побудови БФСТВ в цілому, наслідком якої є вельми значне здешевлення і скорочення термінів розробки системи. Реалізація принципу універсальності побудови БФСТВ для визначення параметрів руху ВДЛА і КА також забезпечує значне зниження витрат на її проектування, виготовлення та експлуатацію.

Побудова і функціонування бортової апаратури БФСТВ полягають у наступному [109, 112].

1. Відмінна риса побудови і функціонування розроблюваної бортової апаратури (БА) БФСТВ полягає в тому, що вона повинна приймати один запитний сигнал від одного наземного передавача, а

випромінювати в напрямку приймальних пунктів три когерентних між собою ГНСС-подібних сигнали (має дотримуватися і кодово-фазова когерентність) на рознесених частотах з однією і тією ж модулюючою псевдовипадковою послідовністю (ПВП) – одним і тим же кодом, як, наприклад, в глобальній навігаційній супутниковій системі ГЛОНАСС.

Така взята за основу схема побудови БА дозволить виконувати траєкторні визначення параметрів руху кількох об'єктів одночасно. БА БФСТВ повинна здійснювати прийом запитного складного фазоманіпульованого ГНСС-подібного сигналу (або сигналу з модуляцією QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) наземного передавача системи, що випромінюється в діапазоні ~ 2,3-2,4 ГГц з шириною спектра ~ 1,5-2,0 МГц. У «відповідь» БА кожного з контрольованих об'єктів повинна випромінювати три сигнали на одних і тих же частотах для економії частотного ресурсу.

2. БА кожного з одночасно контрольованих об'єктів має здійснювати кодування трьох відповідних фазоманіпульованих ГНСС-подібних сигналів псевдовипадковими ортогональними послідовностями (ПВП, кодами), унікальними для БА кожного з контрольованих об'єктів. Кодове розділення сигналів дає можливість в наземних приймачах здійснити розрізнення (ідентифікацію) і роздільну оцінку параметрів сигналів в блоках цифрової обробки, заощадити частотні ресурси і застосувати при розробці приймачів добре відпрацьовані технології прийому та обробки ГНСС-сигналів.

3. Для прискорення виявлення запитного сигналу бортовою апаратурою і підвищення надійності стеження за частотою запитного сигналу, що приймається БА, одночасно з запитним фазоманіпульованим сигналом запропоновано випромінювати когерентний синусоїдальний пілот-сигнал (див. рис. 2), зсунутий за

частотою по відношенню до несучої кодованого сигналу поза смугою спектра, зайнятою кодованим сигналом.

4. Параметри сигналу, що приймається – затримка і доплерівська частота – мають бути враховані при формуванні відповідних сигналів так, щоб на наземних вимірювальних пунктах (ВП-ах) (за умови високоточної синхронізації шкал часу наземних передавача і приймачів ВП-ів) на всіх трьох частотах були виміряні суми відстаней (петльові відстані) і суми радіальних швидкостей (петльові радіальні швидкості) на трасах «наземний передавач – БА – наземні вимірювальні пункти».

5. Затримки сигналів у БА повинні бути мінімізовані. Точні затримки сигналів повинні визначатися в процесі спеціального калібрування трактів БА. Наземні ВП-и повинні здійснювати вимірювання різниць фаз прийнятих коливань і коливань, що генеруються місцевими (кожного ВП-а) еталонами частоти і часу.

6. Енергетичні характеристики бортового обладнання ВДЛА і КА (які рухаються на орбітах з різними висотами) істотно відрізняються [109], що призводить до необхідності реалізації кількох варіантів структурних схем бортової апаратури. У ряді випадків (і при випробуваннях ВДЛА, і при траєкторних вимірюваннях низькоорбітальних КА) доцільно використовувати і беззапитний режим, коли БА випромінює ГНСС-подібні когерентні сигнали в напрямку наземних ВП-ів (режим «радіомаяка»). Ця модифікація апаратури функціонально значно простіша, має менші масогабаритні характеристики і вартість.

7. Що стосується бортових антен контрольованих об'єктів, то передбачається, що на ВДЛА (зважаючи на особливості конструкцій ракет, що підлягають випробуванням) будуть встановлюватися кільцеві мікрополоскові антени «wraparound»-типу **L**- і частково **S**-діапазонів (див., наприклад, сайт http://www.haigh-

farr.com/index.shtml і матеріали фірми Haigh-Farr, Inc. США), які одночасно приймають запитні і випромінюють відповідні сигнали БФСТВ (одна антена). Для випадку космічних програм на КА допустима і доцільна установка двох антен – тієї, що приймає запитний сигнал і тієї, що передає відповідні сигнали.

8. Одним з основних вимог до бортової апаратури традиційно вважається забезпечення мінімально можливих масогабаритних характеристик і потужності споживання, а для бортової апаратури ВДЛА необхідно забезпечити також досить низьку вартість серійного зразка.

В цілому, запропоновані структурні схеми бортової апаратури підтвердили можливість її технічної реалізації. Пропоновані схеми і параметри БА дозволять забезпечити необхідний рівень вихідної потужності бортового передавача, задану чутливість приймального пристрою, необхідну смугу стеження системи фазового автопідстроювання частоти БА з урахуванням максимальних доплерівських зсувів частот сигналів, що приймаються.

9.2 Задачі і функції багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань для визначення параметрів руху високодинамічних літальних апаратів (ВДЛА) і перспективних космічних апаратів (КА)

9.2.1 Багатопозиційна фазова (фазометрична) система траєкторних вимірювань (БФСТВ) має розроблятися як багатоцільова/універсальна система для проведення:

– траєкторних вимірювань (визначення параметрів траєкторій в режимі постобробки вимірювань) і навігації (в реальному часі) космічних апаратів (КА) при їх виведенні на орбіту і русі по орбітах з висотами від ~ 200 км до 36 тис. км, включаючи зону розривного навігаційного поля (вище ~ 2÷3 тис. км) глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС);

– траєкторних вимірювань в ході полігонних випробувань об'єктів військової техніки (ракетних комплексів різного призначення, пілотованих і безпілотних літальних апаратів (ЛА), об’єктів авіації та ін.).

Виконання траєкторних вимірювань в ході тестування і відпрацювання автономних систем керування перелічених вище високодинамічних літальних апаратів (ВДЛА) має здійснюватися з необхідними характеристиками по точності, які визначаються Замовником, для кожного виду техніки, що проходить випробування і тестування.

Система траєкторних вимірювань має включати в себе не тільки радіотехнічну «вимірювальну» частину, але також і способи і засоби збору і обробки вимірювань з метою отримання кінцевого продукту – оцінок параметрів траєкторій/параметрів руху контрольованих об'єктів.

9.2.2 Основним завданням системи (БФСТВ) є здійснення процесу вимірювання та реєстрації прийнятих від контрольованих об'єктів (КО) параметрів радіосигналів (ретрансльованих КО або випромінених без запиту) – затримок, доплерівських зсувів несучих частот, фазових затримок, амплітуд.

При цьому вказані параметри сигналів мають перетворюватися на їх геометричні аналоги – відстані/псевдовідстані, радіальні швидкості/псевдошвидкості, різниці фазових відстаней/псевдовідстаней та/або їх можливі лінійні комбінації в разі проведення багатопозиційних вимірювань або вимірювань на кількох несучих частотах. Параметри з приставкою «псевдо» належать до беззапитних вимірювальних систем, таких як GPS/ГНСС.

Далі система в центрі обробки (в режимах постобробки або реального часу) має здійснити із заданою точністю траєкторні визначення, тобто виконати рішення оберненої задачі – визначити (оцінити) параметри траєкторії (або параметри руху КО) за результатами траєкторних вимірювань, тобто за результатами вимірювань параметрів радіосигналів, що приймаються від КО вимірювальними пунктами системи.

Параметри траєкторії КО – це сукупність трьох координат (місця розташування) і трьох складових вектора швидкості (СВШ) певної заздалегідь визначеної точки фізичного тіла КО в заданій прямокутній системі координат, які змінюються в часі та віднесені до рівнодискретних часових відліків (епох) заданої шкали часу. Параметри траєкторії КО (зазвичай це сім параметрів, включаючи час/епоху) при необхідності можуть включати і більш високі похідні за часом координат, СВШ. У цьому звіті використовується й інший термін – «параметри руху» КО, еквівалентний терміну «параметри траєкторії».

Під заздалегідь визначеною точкою фізичного тіла КО при радіотехнічних вимірюваннях зазвичай розуміється середній фазовий центр (або центр випромінювання) бортової випромінюючої (приймально-передавальної) антени КО. Положення фізичної точки середнього фазового центру антени КО визначається з використанням спеціальних методик і засобів юстування.

9.2.3 Темп циклів вимірювань і видачі результатів траєкторних визначень визначається динамікою контрольованих об'єктів і зазвичай перебуває в

діапазоні 1÷10 Гц. Налаштування апаратури БФСТВ мають передбачати можливість зміни темпу вимірювань.

Бортова апаратура (в тому числі, бортові антени) КО і наземні вимірювальні пункти БФСТВ під час виконання траєкторних вимірювань мають здійснювати надійний радіозв'язок в умовах маневрування і еволюцій руху КО, а також в умовах обертання КО (навколо поздовжньої осі) з заданими кутовими швидкостями.

Бортова апаратура КО і наземні вимірювальні пункти БФСТВ мають надійно виконувати вимірювання з мінімальними похибками стеження в умовах високої динаміки зміни параметрів сигналів, що приймаються (динаміки доплерівских частот, їх похідних за часом), яка визначається типами контрольованих об'єктів.

9.2.4 Основним режимом оцінювання параметрів траєкторій/параметрів руху КО має бути режим післясеансної (камеральної) обробки, (реалізує найвищу точність і надійність траєкторних визначень), який реалізується після того, як вимірювання проведені і їх результати зареєстровані. Режим обробки в реальному часі вимагає помітного ускладнення системи, однак і цей допоміжний режим може бути реалізований як такий, що дозволяє проводити експрес-аналіз результатів траєкторних вимірювань. Багато що залежить від того, де і коли потрібні результати траєкторних визначень. У разі льотно-конструкторських випробувань об’єктів, як правило, результати оцінки параметрів траєкторій потрібні не на борту КО, а в центрі обробки і аналізу для порівняння з результатами вимірювань бортових автономних систем навігації і керування. У цьому випадку досить реалізувати найбільш точний і надійний післясеансний режим обробки результатів траєкторних вимірювань. Якщо результати оцінки параметрів траєкторій КО потрібні і на борту КО для цілей керування його рухом (наприклад, в разі керування рухом космічних апаратів), то система траєкторних вимірювань повинна виконувати траєкторні визначення

і в реальному часі, а результати визначень передавати на борт КО теж в реальному часі.

9.2.5 Для полігонних траєкторних вимірювань БФСТВ має функціонувати в двох варіантах виконання: наземному і морському (з використанням плавзасобів або буїв). Морський варіант побудови системи призначається для полігонних випробувань зразків озброєння і військової техніки в акваторії Чорного моря.

Багатопозиційна система траєкторних вимірювань, що розробляється, має передбачати модульний принцип побудови з можливістю її оптимальної реконфігурації під конкретні завдання для визначення параметрів руху конкретних ВДЛА або КА з можливістю швидкого розгортання і введення в експлуатацію в заданому районі.

Обмін вимірювальною інформацією між елементами системи і центром збору та обробки для прецизійної координатної прив'язки і синхронізації рознесених модулів має здійснюватися з використанням засобів мобільного Інтернет або інших засобів і способів. Зокрема, в разі відсутності можливості радіообміну спостереженнями між елементами системи (вимірювальними пунктами – ВП-ми) і центром збору та обробки, припустимі прості методи збору спостережень шляхом безпосереднього зчитування вимірювальної інформації з внутрішніх накопичувачів ВП-ів персоналом, що обслуговує систему.

9.2.6 Система, що розробляється, повинна бути достатньо недорогою, відносно простою і надійною в експлуатації. Ці якості, в сукупності з необхідністю виконати розробку в короткі терміни, можуть бути досягнуті в разі, якщо організації-розробники мають необхідний доробок і досвід і зможуть його використовувати в ході виконання планованої в подальшому ДКР.

В даному випадку принципи побудови і функціонування БФСТВ базуються на використанні сучасних ГНСС-технологій точного

позиціонування, які розвиваються в ряді організацій України. Ці технології являють собою сукупність методів і засобів отримання координат статичних або рухомих об'єктів з сантиметровою точністю з використанням сигналів глобальних навігаційних супутникових систем і допоміжної інформації (або корекцій) від наземних мереж референцних ГНСС-станцій, координати яких визначені раніше з міліметровою/сантиметровою точністю.

Використання при створенні БФСТВ вже напрацьованих апробованих ГНСС-технологій як в апаратній частині, так і в частині програмно-математичного забезпечення – це одна з ключових переваг запропонованого принципу побудови БФСТВ в цілому, наслідком якої є вельми значне здешевлення і скорочення термінів розробки системи.

9.2.7 Система має виконувати траєкторні визначення параметрів руху кількох об'єктів одночасно. Бортова апаратура має бути побудована таким чином, щоб заощадити частотний ресурс, тому доцільно проектувати систему з кодовим розділенням сигналів, що приймаються від різних КО. Таке кодове розділення сигналів дає можливість в приймачах ВП-ів здійснити розрізнення (ідентифікацію) і роздільну оцінку параметрів сигналів в блоках цифрової обробки, заощадити частотні ресурси і застосувати при розробці приймачів ВП-ів добре відпрацьовані технології прийому та обробки ГНСС-сигналів. Наземні приймачі ВП-ів мають розроблятися з урахуванням одного і того ж принципу/технології одночасного прийому і обробки як сигналів ГНСС, так і сигналів від контрольованих об'єктів (ВДЛА, КА). При цьому блоки цифрової обробки всіх сигналів, що приймаються приймачами ВП-ів, із синхронізацією від одного опорного генератора приймача мають бути реалізовані в одній інтегральній схемі.

Більш детально завдання і функції БФСТВ будуть розглядатися в ході подальшого проектування системи.

9.3 Наземне обладнання БФСТВ

9.3.1 До БФСТВ, що розробляється, ставляться такі вимоги по виконанню:

– наземне обладнання БФСТВ повинне мати можливість швидкого розгортання;

– вимірювальні приймальні пункти БФСТВ і приймально-передавальний пункт БФСТВ повинні мати невеликі габарити і вагу і доставлятися до місць розміщення на автомобілі (в морському виконанні – на легкому катері);

– живлення пунктів БФСТВ має бути автономним (від внутрішніх акумуляторів); для передавача БФСТВ можливе застосування зовнішніх акумуляторів або бензинового генератора. Час автономної роботи БФСТВ має бути достатнім для проведення сеансу визначення параметрів руху контрольованих об'єктів (КО).

Після розгортання і вмикання вимірювальний приймальний пункт повинен в автономному режимі (без участі оператора) виконувати наступні функції:

– пошук, виявлення, стеження за сигналами контрольованих об'єктів та вимірювання їх поточних навігаційних параметрів (затримки, фази і доплерівських зсувів частот);

– пошук, виявлення, стеження за сигналами ГНСС та вимірювання їх поточних навігаційних параметрів (затримки, фази і доплерівських зсувів частот);

– передачу результатів вимірювань на центральний вимірювальний пункт по каналах мобільного Інтернет або по інших спеціалізованих каналах зв'язку;

– реєстрацію вимірювальної інформації на накопичувач для післясеансної обробки результатів вимірювань.

9.3.2 До складу наземного вимірювального приймального пункту БФСТВ входять:

– приймальна антена (може встановлюватися на геодезичній тринозі);

– приймач сигналів КО і ГНСС;

– контролер (опціонально) для індикації роботи приймача;

– накопичувач для зберігання зареєстрованої інформації з метою її обробки в післясеансному режимі;

– акумулятори, що забезпечують можливість автономної роботи приймача;

– засоби зв'язку (мобільний Інтернет або інші спеціалізовані засоби зв'язку) для передачі зареєстрованої інформації на центральний вимірювальний пункт в реальному масштабі часу.

Після увімкнення апаратура приймального пункту БФСТВ має функціонувати у варіанті без обслуговування (без участі оператора).

Вимірювальний приймальний пункт БФСТВ в зібраному стані повинен мати невеликі габарити і вагу і повинен допускати можливість транспортування наземним транспортом (автомобіль типу «Газель», КУНГ і т.д.).

Основним елементом вимірювального приймального пункту БФСТВ є приймач, здатний приймати як сигнали ГНСС, так і сигнали КО з високою динамікою зміни їх параметрів (затримки, фази і доплерівских зсувів частот). Точність всіх спостережень (як за сигналами ГНСС, так і за сигналами від КО) має відповідати точності спостережень (затримки, фази і доплерівских зсувів частот) сучасних ГНСС-приймачів геодезичного класу.

Структура приймача інтерферометра БФСТВ в частині роботи з сигналами ГНСС відповідає типовій структурі ГНСС-приймача. У аналоговій частині приймача сигнали ГНСС приймаються антеною, посилюються попереднім підсилювачем, перетворюються по частоті

донизу і піддаються дискретизації з використанням аналого-цифрового перетворювача з частотою, що задається опорним генератором і формується синтезатором частоти. Підсилення сигналу регулюється блоком автоматичного регулювання підсилення. Далі відліки сигналів надходять до блоку цифрової обробки сигналів, що містить N каналів роботи з сигналами ГНСС, у яких здійснюється виявлення сигналів супутників ГНСС, стеження за кодом і фазою сигналів, виділення цифрової інформації, яка містить альманахи ГНСС, ефемериди, параметри годинників, параметри іоносфери і формування поточних навігаційних параметрів (ПНП). Далі ПНП всіх каналів надходять до навігаційного процесора (НП) і до процесора вторинної обробки, у яких виконується перетворення спостережень КО і ГНСС (включаючи високоточну прив'язку до шкали часу ГНСС (GPS)), координатна прив'язка приймальних антен та ін. Точні траєкторні визначення параметрів руху КО здійснюються в підсистемі збору і обробки спостережень.

Для вирішення завдань прецизійної координатної прив'язки приймальних антен ВП-ів БФСТВ (як статичних, так і морських «плаваючих»), а також для уточнення параметрів використовуваних моделей тропосферної затримки необхідно застосувати покупні OEM-модулі, які гарантовано забезпечать отримання зазначених даних із заданою точністю запропоновано в склад ВП БФСТВ внести додатковий OEM-модуль – багатосистемний (GPS+ГЛОНАСС+Galileo) багаточастотний приймач геодезичного класу апробованого на світовому ринку виробника (наприклад, канадської компанії NovAtel). На жаль, аналогів подібного високоякісного ГНСС-приймача на даний момент вітчизняні підприємства не виробляють.

У приймачі вимірювального пункту БФСТВ додатково введені кілька каналів для роботи з сигналами КО. Як і в каналах роботи з ГНСС, в них здійснюється виявлення сигналів супутників КО, стеження за кодом і фазою сигналів і формування поточних навігаційних параметрів. На відміну від вимірювальних каналів сигналів ГНСС, в каналах обробки сигналів КО відсутній блок виділення цифрової інформації (сигнали КО, на відміну від сигналів ГНСС, не будуть містити цифрової інформації). Вимірювані параметри сигналів КО мають істотно більшу динаміку зміни в порівнянні з сигналами ГНСС, і канали стеження за сигналами КО мають здійснювати надійне виявлення і стеження за сигналами. З огляду на нетривалі інтервали польоту КО, час виявлення та початку видачі ПНП має бути мінімальним.

Аналогова частина приймача в порівнянні з приймачем ГНСС допрацьовується для можливості додаткового прийому сигналів КО. Крім того, допрацьовується програмне забезпечення навігаційного процесора для спільної обробки інформації ГНСС і КО.

Склад вимірювального пункту БФСТВ в морському виконанні аналогічний складу наземного вимірювального пункту, але вся апаратура приймального пункту повинна бути змонтована на плавучому буї, що має герметичний корпус для захисту від попадання вологи (бризок води, хвиль). Додатково буй має бути обладнаний передавачем, що передає свої координати (отримані ГНСС-приймачем) для полегшення його пошуку після закінчення сеансу.

9.3.3 У складі приймально-передавального пункту БФСТВ (який реалізує запитний режим роботи системи з вимірюваннями петльових відстаней) передбачаються наступні складові частини:

– передавальна антена;

– ередавач запитного сигналу;

– приймальна антена (включаючи варіант розміщення на геодезичній тринозі);

– приймач сигналів КО і ГНСС;

– контролер для індикації роботи приймача (опціонально);

– накопичувач для зберігання зареєстрованої інформації з метою її обробки в післясеансному режимі;

– акумулятори або бензиновий генератор, щоб забезпечити можливість автономної роботи приймально-передавального пункту;

– засоби зв'язку (мобільний Інтернет або інші спеціалізовані засоби зв'язку) для прийому інформації від всіх вимірювальних пунктів в реальному масштабі часу;

– ноутбук з встановленим ПМЗ сумісної обробки результатів ГНСС-спостережень і спостережень сигналів КО.

Центральний вимірювальний пункт, що входить до складу приймально-передавального пункту БФСТВ, за своїм складом ідентичний іншим вимірювальним пунктам БФСТВ.

Передавач запитного сигналу (аналог псевдосупутника) формує і випромінює сигнал, схожий за параметрами на навігаційні сигнали ГНСС.

Вимоги до реалізації наземних антен приймача і передавача будуть сформовані на наступних етапах розробки. При розробці приймальних антен необхідно розглянути можливість використання покупних багатосистемних ГНСС-антен геодезичного класу. Для цього необхідно провести тестування і дослідження їх характеристик в заданому частотному діапазоні на базі наявного обладнання ННЦ «Інститут метрології» (м.Харків).

9.4 Принципи побудови і функціонування бортової апаратури (БА) БФСТВ

9.4.1 Відмінною рисою побудови і функціонування розроблюваної бортової апаратури системи є те, що БА повинна приймати один запитний складний фазоманіпульований сигнал (від одного наземного передавача/псевдосупутника), а випромінювати в напрямку наземних приймальних вимірювальних пунктів (ВП-ів) БФСТВ три когерентних між собою ГНСС-подібних сигнали (має дотримуватися і кодово-фазова когерентність) на рознесених на задані величини частотах з однією і тією ж модулюючою псевдовипадковою послідовністю (ПВП) – одним і тим же кодом, як у глобальній навігаційній супутниковій системі ГЛОНАСС.

9.4.2 Для прискорення виявлення запитного сигналу бортовою апаратурою і підвищення надійності стеження за частотою прийнятого запитного сигналу доцільно паралельно випромінювати не тільки модульований обраною ПВП сигнал, але і синусоїдальний, когерентний фазоманіпульованому, пілот-сигнал, зсунутий за частотою по відношенню до несучої кодованого сигналу поза смугою спектра, яку займає кодований сигнал.

9.4.3 Параметри сигналу – затримка і доплерівська частота – мають бути враховані при формуванні відповідних сигналів так, щоб на наземних вимірювальних пунктах (за умови високоточної синхронізації шкал часу наземних передавача і приймачів ВП-ів) на всіх трьох частотах були виміряні суми відстаней (петльові відстані) і суми радіальних швидкостей (петльові радіальні швидкості) на трасах «наземний передавач – БА – наземні вимірювальні пункти». Затримки сигналів у БА мають бути мінімізовані. Точні затримки сигналів будуть визначатися в процесі спеціального калібрування трактів БА. Наземні ВП-и мають виконувати вимірювання різниць фаз прийнятих коливань і коливань, що генеруються місцевими (кожного ВП) еталонами частоти і часу.

В результаті збору вимірювальної інформації в центрі обробки мають бути сформовані вищезазначені петльові відстані, петльові радіальні швидкості, різниці кодових і фазових відстаней на трасах «контрольований об'єкт – наземні вимірювальні пункти» і швидкості зміни цих різниць відстаней (за результатами обробки доплерівських і фазових спостережень) .

9.4.4 У випадку, коли система повинна виконувати траєкторні визначення параметрів руху кількох об'єктів одночасно, БА кожного з контрольованих об'єктів має випромінювати «відповіді» (три вказаних вище сигнали) на одних і тих же частотах для економії частотного ресурсу. Але БА кожного з одночасно контрольованих об'єктів має здійснювати кодування трьох відповідних фазоманіпульованих ГНСС-подібних сигналів псевдовипадковими послідовностями (ПВП, кодами), унікальними для БА кожного з контрольованих об'єктів. Кожна ПВП з обраного сімейства (ПВП одного типу, як, наприклад, С/А-коди Голда в системі GPS) повинна бути ортогональна (або майже ортогональна) іншим ПВП даного сімейства.

Кодове розділення сигналів дає можливість в приймачах ВП-ів здійснити розрізнення (ідентифікацію) і роздільну оцінку параметрів сигналів, що приймаються, в блоках цифрової обробки, заощадити частотні ресурси і застосувати при розробці приймачів ВП-ів добре відпрацьовані технології прийому та обробки ГНСС-сигналів. Наземні приймачі ВП-ів мають розроблятися з урахуванням одного і того ж принципу/технології одночасного прийому і обробки як сигналів ГНСС, так і сигналів від контрольованих об'єктів (ВДЛА, КА). При цьому блоки цифрової обробки всіх прийнятих сигналів приймачів ВП-ів із синхронізацією від одного опорного генератора приймача мають бути реалізовані в одній інтегральній схемі.

Використання при створенні БФСТВ вже напрацьованих апробованих ГНСС-технологій як в апаратній частині, так і в частині програмно-математичного забезпечення – це одна з ключових переваг запропонованого

принципу побудови БФСТВ в цілому, наслідком якої є вельми значне здешевлення і скорочення термінів розробки системи.

9.4.5 Даний принцип побудови БА, як випливає з викладеного, вигідно відрізняється від використаної раніше в ряді вимірювальних систем (наприклад, в системах WAAS (США), EGNOS (ЄС)) «транспарентної» («прозорої») схеми, яка передбачає просту ретрансляцію прийнятих від передавача сигналів з простим перенесенням спектру прийнятих коливань на задану (виходячи з ряду діючих факторів) іншу частоту випромінювання. «Плюси» запропонованої схеми функціонування БА (і БФСТВ в цілому) на відміну від ретрансляційної полягають у тому, що при багатоканальній роботі системи (відстеження одночасно кількох КО) досить одного запитного сигналу (немає необхідності випромінювати одночасно три сигнали в широкій смузі частот) і одного передавача для всіх контрольованих об'єктів (в заданому секторі просторового огляду). При роботі з кількома КО схема з ретрансляцією потребувала б реалізації частотного розділення випромінюваних кількома БА сигналів, що призвело б до істотного розширення спектра сигналів БФСТВ і проблем з використанням частотного ресурсу. Розширення спектру сигналів БФСТВ призведе і до проблем в реалізації аналогової частини приймачів наземних ВП-ів.

БА БФСТВ має виконувати прийом запитного складного фазоманіпульованого GPS-подібного сигналу (або сигналу з модуляцією QPSK) наземного передавача системи, випромінюваного в діапазоні ~2,3-2,4 ГГц (див. рис. 9.2 попереднього частотного плану БФСТВ); ширина спектру випромінюваного наземним передавачем сигналу ~1,5-2,4 МГц – наприклад, С/А код Голда GPS (~2,4 МГц) або кодування QPSK (~1,5 МГц).

У напрямку наземних ВП-ів БА повинна здійснювати передачу трьох когерентних між собою (повинна дотримуватися і кодово-фазова когерентність) ГНСС-подібних сигналів на рознесених на задані величини частотах з однією і тією ж модулюючою псевдовипадковою послідовністю (ПВП) – одним і тим же кодом.

Попередньо частоти випромінювання відповідних сигналів БА наступні:

$f_{R_1} \approx 1650\ МГц,\ f_{R_2} \approx 2000\ МГц,\ f_{R_2} \approx 2070\ МГц.$

Передбачається, що на ВДЛА (зважаючи на особливості конструкцій ракет, що підлягають випробуванням) будуть встановлюватися кільцеві мікрополоскові антени «wraparound»-типу **L-** і частково **S**-діапазонів (див., наприклад, сайт http://www.haigh-farr.com/index.shtml і матеріали фірми Haigh-Farr, Inc США), які одночасно приймають запитні і випромінюють відповідні сигнали БФСТВ (одна антена). Для випадку космічних застосувань на КА допустиме припущення про можливість встановлення двох антен – тієї, що приймає запитний сигнал і тієї, що передає відповідні сигнали.

Не у всіх випадках доцільно використовувати запитний режим вимірювань, в ряді випадків (і при випробуваннях ВДЛА, і при траєкторних вимірюваннях низькоорбітальних КА) доцільно використовувати і беззапитний режим, коли БА просто випромінює описані вище GPS-подібні когерентні сигнали в напрямку наземних ВП-ів (режим «свистка»). Тому необхідно, щоб БА була універсальною, що дозволяє реалізувати як запитний, так і беззапитний режими роботи.

9.5 Експериментальне підтвердження досягнення заданих характеристик точності БФСТВ

Як показав аналіз, для експериментального підтвердження працездатності та очікуваних характеристик точності БФСТВ на даному етапі розробки представляються можливими і необхідними такі підходи:

- проведення експерименту з використанням реальної вимірювальної GPS-інформації (спостережень мережі перманентних референцних станцій на території України); в ході експерименту пропонується виділити 1-2 супутника

GPS з поточного робочого сузір'я, оцінити (з використанням мережі наземних станцій в якості довгобазисного інтерферометра) траєкторії руху цих супутників і порівняти отримані оцінки з прецизійними еталонними даними від міжнародної служби IGS; даний підхід дозволить (в разі відсутності можливості проведення натурного макетування системи) достовірно довести не тільки принципову можливість реалізації МФСТІ, але і можливість досягнення заявленої точності траєкторних вимірювань на віддаленнях КА ~20–25 тис. км від наземного інтерферометра системи на території України;

♦ виготовлення макета МФСТІ мінімальній комплектації (за умови фінансування цих робіт) і проведення тестування на одному з полігонів ГНИЦ з використанням летального апарату (літака, вертольота, дрона).

Обидва зазначених підходи являються об'єктивними способами підтвердження працездатності та очікуваних характеристик точності розроблюваної БФСТВ, оскільки ґрунтуються на реальних вимірах. Експерименти з реальної вимірювальної інформацією допоможуть уточнити математичні моделі БФСТВ, які, в свою чергу, допоможуть поліпшити алгоритми обробки реальних спостережень.

На даному етапі розробки був реалізований перший із зазначених способів підтвердження працездатності та очікуваних характеристик точності розроблюваної МФСТІ. Отримані експериментальні результати (див. розділ 11) цілком підтверджують правильність концепції побудови, функціонування БФСТВ, а також її працездатність. Результати апостеріорної оцінки точності траєкторних визначень координат супутників, що отримані в ході обробки реальних GPS-спостережень, близько співпадають з апріорними оцінками точності БФСТВ, які були отримані з використанням моделі похибок системи.

Висновки

1) Виконано науково-технічне обґрунтування концепції побудови та функціонування багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань

(БФСТВ). Визначені структура і функціональне призначення складових наземного і бортового сегментів високоточної багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ).

2) Запропонована до реалізації БФСТВ включає наземний/морський сегмент (передача сигналів на контрольовані об'єкти і прийом сигналів від них з використанням мережі модифікованих ГНСС-приймачів геодезичного класу) і бортовий приймач ГНСС-подібних фазоманіпульованих сигналів з ефективною шириною спектру ~2,4 МГц на декількох рознесених несучих частотах (наприклад, в радіодіапазоні ~1,7–2,4 ГГц), причому частоти передачі і прийому відрізняються на заданий фіксований зсув для виключення інтерференції.

3) Сформульовані задачі та функції багатопозиційною фазової системи траєкторних вимірювань для визначення параметрів руху приземних ВДЛА і перспективних КА.

4) Запропоновані способи підтвердження працездатності та досягнення заданих характеристик точності БФСТВ, які передбачають проведення експериментів з реальної вимірювальної інформацією.

10 АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ (ПМЗ) ПІСЛЯСЕАНСНОЇ ОБРОБКИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ БФСТВ

В ході аналізу шляхів реалізації БФСТВ виконана проробка структури програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) БФСТВ для сумісної обробки спостережень параметрів сигналів від контрольованих об'єктів (КО) і сигналів ГНСС і визначення параметрів руху (координат і складових вектора швидкості) КО в умовах високої динаміки зміни параметрів сигналів БФСТВ в режимах

післясеансної обробки і реального часу. Визначені і деталізовані вхідні і вихідні параметри, функції і завдання ПМЗ, наведені методи і функції алгоритмів обробки спостережень. Визначено основні етапи розробки ПМЗ БФСТВ.

10.1 Завдання і функції програмно-математичного забезпечення сумісної обробки спостережень параметрів сигналів від контрольованих об'єктів і сигналів ГНСС. Структура ПМЗ

10.1.1. Вхідні і вихідні параметри ПМЗ післясеансної обробки «сирих» спостережень БФСТВ

За джерелами надходження вхідні дані ПМЗ БФСТВ діляться на:

– дані первинної обробки ГНСС-спостережень;

– дані первинної обробки спостережень контрольованих об'єктів;

– дані калібрування апаратури БФСТВ;

– дані міжнародного центру IGS обробки ГНСС-спостережень.

Дані первинної обробки ГНСС-спостережень надходять від приймачів вимірювальних пунктів (ВП-ів) БФСТВ і включають в себе:

– час спостережень в шкалі GPS;

– номера спостережуваних супутників ГНСС;

– дані первинних двочастотних вимірювань каналів приймачів (поточні навігаційні параметри – вимірювання псевдовідстані, фазові вимірювання, доплерівські зсуви частоти на частотах L1 і L2, співвідношення сигнал/шум спостережуваних сигналів);

– бортові ефемериди спостережуваних супутників GPS;

– параметри іоносфери;

– параметри перерахунку часу GPS і UTC.

Дані первинної обробки спостережень контрольованих об'єктів надходять від приймачів ВП-ів БФСТВ і включають в себе:

– час спостережень в шкалі GPS (збігається з часом спостереження даних ГНСС-спостережень);

– номера спостережуваних контрольованих об'єктів;

– дані первинних тричастотних вимірювань приймачів (поточні навігаційні параметри – вимірювання псевдовідстані, фазові вимірювання, доплерівські зсуви частоти на трьох частотах, співвідношення сигнал/шум спостережуваних сигналів).

Дані калібрування апаратури являють собою набір змінних констант, які формуються виробником БФСТВ, оновлюються при калібруванні і включають в себе:

– зміщення фазових центрів бортових антен контрольованих об'єктів відносно точок, для яких визначаються параметри руху (наприклад, центрів мас);

– зміщення фазового центру передавальної антени щодо фазового центру приймальної антени центрального вимірювального пункту;

– результати калібрування фазових діаграм спрямованості бортових антен контрольованих об'єктів, передавальної та приймальних антен БФСТВ;

– результати калібрування затримок сигналів від контрольованих об'єктів і ГНСС-сигналів на всіх частотах, що приймаються, в аналогових трактах приймачів БФСТВ.

Дані міжнародних центрів обробки IGS, що отримуються з Інтернет, включають в себе:

– передбачені і точні ефемериди та параметри годинників ГНСС на дату проведення сеансу вимірювань;

– параметри іоносфери (іоносферні карти) на дату проведення сеансу вимірювань;

– зміщення фазових центрів антен супутників ГНСС відносно центрів мас супутників (в разі зміни таких зміщень або при запуску нових супутників ГНСС);

– результати калібрування кодових і фазових затримок в апаратурі ГНСС.

Вихідні дані ПМЗ БФСТВ включають в себе:

– час і параметри руху (координати і складові вектора швидкості) контрольованих об'єктів;

– оцінку точності визначення параметрів руху контрольованих об'єктів (кореляційні матриці похибок траєкторних визначень);

– прогнозовані координати точки падіння контрольованого об'єкта (в разі необхідності прогнозування точки падіння КО);

– звіт про умови і результати проведення визначень, в якому відображаються кількість та інтервали видимості спостережуваних супутників ГНСС, геометричний фактор спостережуваного сузір'я ГНСС, рівні і співвідношення сигнал/шум спостережуваних сигналів ГНСС і сигналів контрольованих об'єктів, кількість фазових стрибків і т.д.

10.1.2. Режими роботи ПМЗ обробки спостережень БФСТВ

Передбачається реалізувати чотири основні режими роботи ПМЗ:

– режим планування сеансу вимірювань;

– режим точного визначення координат вимірювальних пунктів БФСТВ;

– режим проведення сеансу вимірювань;

– режим калібрування апаратури БФСТВ.

Режим планування сеансу вимірювань призначений для:

♦ визначення кількості вимірювальних пунктів і конфігурації пунктів БФСТВ (з урахуванням обмежуючих умов – наприклад, характеру і рельєфу місцевості, можливості охорони і електроживлення вимірювальних пунктів та ін.) для забезпечення необхідної точності визначення параметрів руху контрольованих об'єктів на заданій ділянці траєкторії;

♦ вибору конкретних місць розміщення вимірювальних пунктів БФСТВ з урахуванням місцевості та інших факторів;

♦ виконання апріорної оцінки точності (АОТ) визначення параметрів руху контрольованих об'єктів.

Режим планування сеансу вимірювань не є обов'язковим для кожного сеансу: в разі, якщо вимірювальні пункти БФСТВ розташовуються на відомих, заздалегідь обраних позиціях, або встановлені стаціонарно, планування сеансу вимірювань досить виконати один раз, і не повторювати для кожного сеансу.

Режим точного визначення координат вимірювальних пунктів БФСТВ призначений для визначення абсолютних координат центрального вимірювального пункту і відносних координат всіх вимірювальних пунктів БФСТВ для наземного варіанту побудови БФСТВ. Для морського варіанту побудови БФСТВ завдання визначення координат вимірювальних пунктів вирішується сумісно з завданням визначення параметрів руху контрольованих об'єктів. Для забезпечення заданої точності визначення параметрів руху контрольованих об'єктів координати пунктів БФСТВ повинні бути визначені з високою точністю (СКП ~1 см). Для визначення координат вимірювальних пунктів БФСТВ розгортається і вмикається завчасно, не менше ніж за 1 годину до проведення сеансу визначення параметрів руху контрольованих об'єктів. Протягом цього часу здійснюється прийом та реєстрація ГНСС-спостережень.

Після накопичення інформації проводиться спільна обробка інформації всіх приймачів і визначення координат всіх пунктів БФСТВ.

Координати центрального вимірювального пункту БФСТВ можуть бути визначені двома методами:

1) якщо в околі місця розміщення центрального (головного) вимірювального пункту є одна або кілька референцних або перманентних станцій ГНСС-спостережень, координати яких відомі, то координати центрального вимірювального пункту можуть бути визначені в диференціальному режимі з використанням вимірювальної інформації цих станцій;

2) методом точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning), при якому точні абсолютні координати визначаються за вимірюваннями приймача (ВП-а БФСТВ) з використанням точних ефемерид, параметрів годинників та іншої допоміжної інформації, поширюваної IGS.

Координати всіх інших вимірювальних пунктів, крім центрального, визначаються в диференціальному режимі відносно центрального вимірювального пункту шляхом сумісної обробки накопичених ГНСС-спостережень.

Для післясеансної обробки інформації в разі наземного варіанту побудови БФСТВ для визначення координат вимірювальних пунктів може використовуватися не тільки інформація, накопичена до проведення сеансу, але й інформація, зареєстрована під час проведення сеансу і після проведення сеансу визначення параметрів руху контрольованих об'єктів. Якщо пункти БФСТВ встановлені стаціонарно, і координати пунктів (середніх фазових центрів прийомних антен ВП-ів) точно визначені, режим визначення координат для кожного сеансу можна не виконувати, а використовувати відомі координати.

Реєстрація ГНСС-спостережень не повинна припинятися відразу після закінчення прийому інформації від контрольованих об'єктів (наприклад, при їх

падінні або, в разі КА, при виході КА з області видимості БФСТВ) – робота БФСТВ повинна тривати ще не менше години. Зареєстрована інформація може бути використана в післясеансному режимі для найбільш точного визначення координат вимірювальних пунктів, а також для згладжування вимірювальної інформації і полегшення розкриття неоднозначності фазових спостережень, зареєстрованих під час проведення сеансу.

Режим проведення сеансу вимірювань є основним режимом роботи БФСТВ. В даному режимі відбувається одночасна робота передавача БФСТВ, прийом і обробка вимірювальної інформації як за сигналами ГНСС, так і за сигналами контрольованих об'єктів всіма вимірювальними пунктами.

Деталізована архітектура ПМЗ зображена на рисунку 10.1.

На вхід ПМЗ надходять дані первинної обробки ГНСС-спостережень і спостережень контрольованих об'єктів (1), бортові ефемериди і параметри годинників, а також параметри моделі іоносфери і взаємозв'язку шкал часу GPS і UTC (2). У разі необхідності на вхід ПМЗ надходять точні ефемериди і параметри годинників (3).

Всі вхідні дані проходять перевірку на достовірність: виявляються і усуваються аномалії в поточних навігаційних параметрах – псевдовідстані, фазі, доплерівському зсуві частоти, поточні навігаційні параметри фільтруються (6). Ефемеридно-часова інформація ГНСС перевіряється на достовірність (7), вимірювання для супутників з недостовірною ефемеридно-часовою інформацією виключаються з обробки навіть у тому випадку, якщо за даними бортових або точних ефемерид супутник має ознаку «здоровий».

Проводиться згладжування кодових вимірювань (8). Поточні навігаційні параметри, що пройшли препроцесінг (попередню обробку), надходять на вхід рішення навігаційної задачі за кодовими вимірюваннями (9). Координати і складові вектора швидкості контрольованих об'єктів, обчислені з використанням кодового рішення, є найменш точними, але є «точковими» і

можуть бути отримані негайно за вимірюваннями однієї епохи при наявності достатньої кількості вимірювань супутників.

Обов'язковим елементом кодового рішення є процедура автономного контролю цілісності рішення RAIM (11).

Технологія RAIM дозволяє незалежно від системи ГНСС контролювати цілісність робочого сузір'я при наявності надлишкової кількості спостережуваних супутників, виявляти недостовірні супутники і виключати їх з обробки, і, таким чином, забезпечити високу надійність навігаційних та траєкторних визначень.

Далі проводиться «внутрішня» оцінка точності кодового навігаційного рішення, згладжування результатів рішення (14) і формування вихідних даних (17).

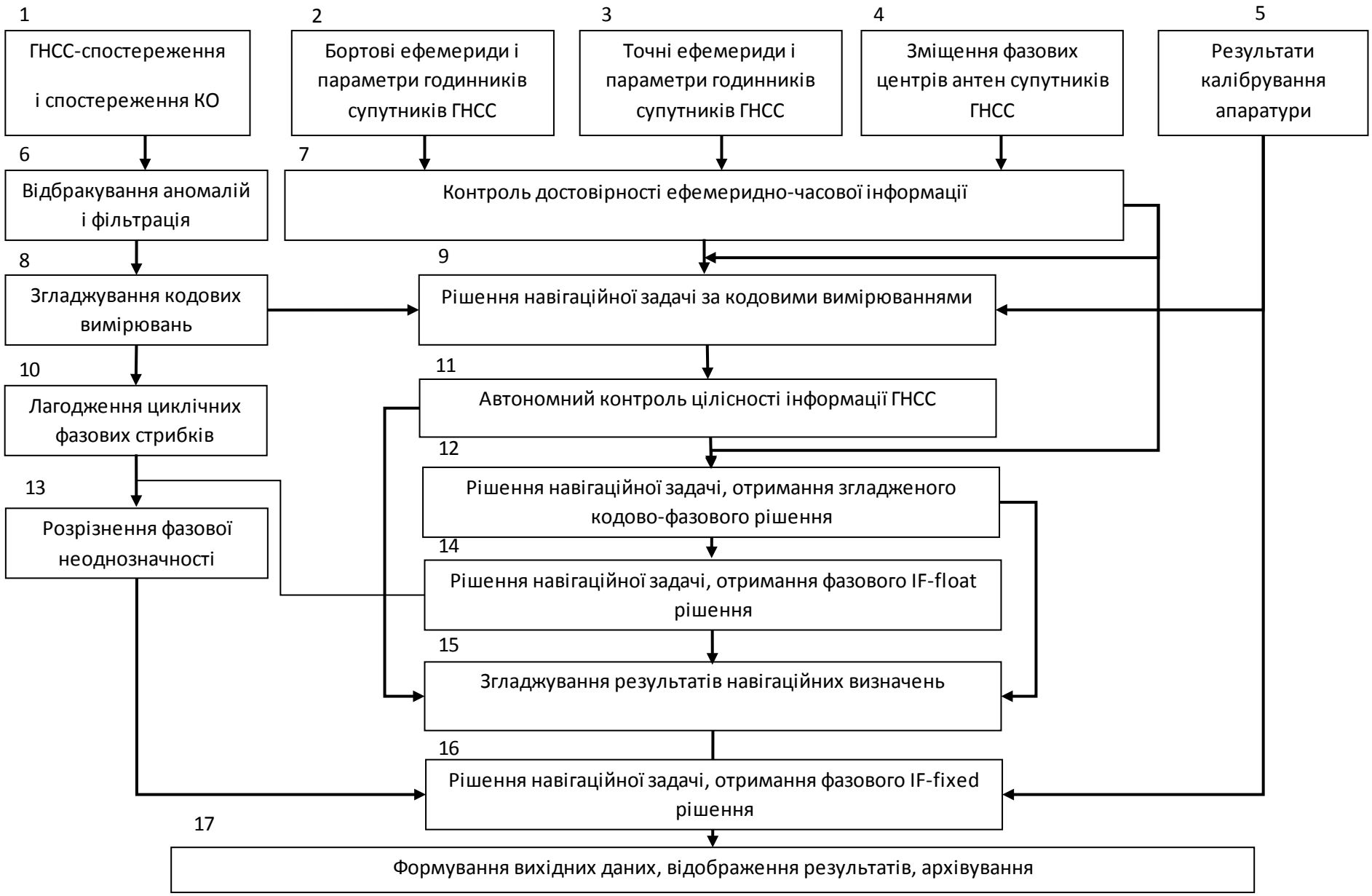


Рисунок 10.1 – АрхітектураПМЗ БФСТВ

Результати кодового навігаційного рішення є важливою апріорною інформацією для досягнення наступних більш точних кодово-фазових і фазових рішень, і вони надходять на вхід відповідних блоків рішень навігаційних задач.

Наступною операцією є лагодження фазових циклічних стрибків (10), рішення навігаційної задачі і формування згладженого кодово-фазового рішення (12). При наявності достатнього інтервалу накопичення вимірювальної інформації виконується більш точне фазове IF-float рішення (14).

Як і в разі кодового рішення, проводиться оцінка точності кодово-фазового і фазового IF-float рішень, їх згладжування і формування вихідного кадру інформації (17).

За умови надійного розрізнення неоднозначності фазових вимірювань (13) і при використанні фазових затримок апаратури, отриманих в результаті калібрування (5), можливе отримання найбільш точного IF-fixed рішення (16).

Завдання, які вирішуються ПМЗ, можна розділити на наступні великі групи:

– алгоритми препроцесінгу (фільтрація і відбракування спостережень, контроль якості ефемеридно-часової інформації, поведінки псевдовідстаней і годинника приймача, контроль якості двочастотних спостережень – псевдовідстаней і псевдошвидкостей по «geometry-free» лінійним комбінаціям);

– алгоритми координатно-часових визначень (координат, складових вектора швидкості і розбіжності шкали часу приймача і шкали часу GPS), оцінки їх точності за вбудованою моделлю похибок і контролю якості визначень;

– формування вихідних даних (включаючи ознаки якості рішення навігаційної задачі) та їх форматів.

Завдання розрізнення фазової неоднозначності (РФН) є ключовим завданням для досягнення найвищої точності визначення параметрів руху контрольованих об'єктів і реалізації потенційної точності БФСТВ.

Надійне РФН може бути здійснено при виконанні наступних умов:

– контролю і забезпечення якості спостережень;

– наявності «безстрибкових» фазових вимірювань,

– фільтрації/згладжування кодових спостережень з використанням фазових;

– використання істотно більш точної ефемеридно-часової інформації супутників ГНСС від служби IGS (прогнозовані дані на 12 годин), яку доцільно/необхідно закачувати до центру обробки спостережень;

– застосування сучасних прогресивних методів і алгоритмів визначення параметрів траєкторій контрольованих об'єктів.

Режим калібрування апаратури БФСТВ призначений для визначення або уточнення змінних констант, які використовуються при сеансі визначень параметрів руху (кодових і фазових затримок ГНСС-сигналів і сигналів контрольованих об'єктів, зміщень фазових центрів антен і т.д.). Калібрування апаратури проводиться при виготовленні і введенні в експлуатацію нової апаратури БФСТВ, а також періодично під час експлуатації (не менше 1-2 разів на рік). Періодичність проведення калібрування уточнюється під час дослідної експлуатації системи.

Калібрування кодових і фазових затримок проводиться в такому порядку:

1) Усі наявні приймачі БФСТВ розміщуються на відкритому полігоні поряд один з одним.

2) Бортова апаратура БФСТВ (один або кілька комплектів) розміщується на БПЛА (дроні).

3) БПЛА виконує обліт полігону на різних висотах і різних відстанях – загальною тривалістю не менше години, а всі приймачі БФСТВ здійснюють прийом і реєстрацію вимірювальної інформації ГНСС і бортової апаратури БПЛА.

4) Накопичена зареєстрована вимірювальна інформація далі обробляється з використанням ПМЗ калібрування, в результаті якої визначаються кодові і фазові затримки апаратури.

Основні алгоритми і модулі обробки інформації в режимі калібрування ідентичні алгоритмам і модулям при роботі в режимі проведення сеансу вимірювань.

10.2 Особливості ПМЗ для обробки спостережень контрольованих об'єктів (ВДЛА або КА) при наземному і морському варіантах реалізації БФСТВ

В цілому ПМЗ післясеансної обробки спостережень ВДЛА при наземному і морському варіантах реалізації БФСТВ дуже схожі і мають багато спільного, але мають і суттєву відмінність: якщо в наземному варіанті завдання абсолютної прив'язки центрального вимірювального пункту і відносної прив'язки всіх вимірювальних пунктів відносно центрального вирішується завчасно і незалежно від визначення параметрів руху ВДЛА, а під час проведення сеансу траєкторних визначень координати усіх вимірювальних пунктів вважаються постійними, то в морському

варіанті завдання визначення координат вимірювальних пунктів вирішується одночасно і паралельно із завданням визначення параметрів руху ВДЛА. Крім того, в наземному варіанті вирішується завдання визначення координат нерухомих (статичних) пунктів, в той час як в морському варіанті координати ВП-ів постійно змінюються за рахунок переміщення плавзасобів з встановленими на них ВП-ами. Тому в ході всього сеансу вимірювань має вирішуватися завдання визначення координат рухомих ВП-ів в кінематичному режимі визначень по фазовим ГНСС-вимірюванням. Це накладає відбиток і на методику проведення визначень – час ініціалізації для РФН в кінематичному режимі визначень більший, ніж в статичному, тому при інших рівних умовах час проведення сеансу визначень параметрів руху ВДЛА в морському варіанті має бути більшим, ніж в статичному. Оскільки завдання визначення координат вимірювальних пунктів і завдання визначення параметрів руху ВДЛА вирішуються одночасно, за рахунок більшого числа оцінюваних параметрів точність визначення параметрів руху ВДЛА в морському варіанті реалізації БФСТВ може бути дещо гіршою, ніж в наземному.

10.3 Експериментальний програмний комплекс «OCTAVA» – основа для розробки ПМЗ БФСТВ

Значна кількість алгоритмів і груп програмних модулів, необхідних для реалізації ПМЗ БФСТВ, розроблена та протестована в ході створення програмного комплексу «OCTAVA» спільної розробки співробітників Харківського національного університету радіоелектроніки і Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО НАНУ). Вітчизняний програмно-

математичний комплекс «OCTAVA», створений в результаті виконаних в 2002–2018 рр. розробок, дозволяє здійснювати обробку статичних/кінематичних GPS-спостережень і виконувати традиційне та мережеве позиціонування сантиметрового рівня точності в одночастотному і двочастотному режимах.

ПК «OCTAVA» функціонує в середовищі програмування MatLab і складається з трьох взаємопов'язаних частин – «OCTAVA_PPA», «OCTAVA_AR & POS», «OCTAVA_IONO». Комплекс «OCTAVA_PPA» призначений для попередньої обробки («препроцесінгу») GPS-спостережень і є фундаментом для подальших стадій обробки. Рішення завдань розкриття фазових неоднозначностей (РФН) і точного позиціонування виконує другий комплекс – «OCTAVA_AR & POS». Третій комплекс, «OCTAVA_IONO» (2013-2015 рр.), вирішує завдання побудови регіональної моделі повного електронного вмісту іоносфери високої точності з використанням двочастотних фазових спостережень в мережах перманентних GPS-станцій. Ця технологія, що включає ряд інновацій, на даний момент має значні переваги відносно зарубіжних аналогів, є альтернативою існуючим підходам і може бути використана в багатопозиційних системах SBAS широкозонної (Wide Area Differential) ГНСС-навігації, а також для удосконалення технологій PPP точного автономного позиціонування .

Комплекс «OCTAVA_PPA» включає процедури, необхідні для виконання багатьох операцій обробки «сирих» GPS-спостережень, що передують основним процедурам позиціонування (тобто згладжування спостережень, РФН, безпосередньо позиціонування, верифікації рішень, оцінки їх точності та ін.). Сукупності таких операцій отримали назву «попередньої обробки і аналізу» (від англ. «Pre-processing-and-analysis» або скорочено, PPA). Зокрема,

ПК «OCTAVA_PPA» призначений для виконання наступних основних операцій:

♦ перетворень вхідних даних до внутрішнього формату з одночасним контролем вхідних даних на відповідність використовуваним форматам;

♦ контролю і забезпечення якості спостережень (усунення аномалій, контроль рівня шуму і наслідків множинного поширення сигналу, швидкості дрейфу опорного генератора приймача і т.д.) і ефемеридно-часової інформації супутників ГНСС;

♦ пошуку, оцінки та усунення циклічних/напівциклічних фазових стрибків одночастотних або двочастотних GPS-спостережень;

♦ корекції шкал часу приймачів, контролю геометричних умов спостережень і параметрів якості рішення навігаційної задачі та ін.;

♦ аналізу результатів попередньої обробки даних і візуалізації контрольних параметрів з висновком про придатність спостережень до подальшої обробки.

Метою попередньої обробки є створення «очищених» і відредагованих масивів спостережень мереж базових станцій і споживачів, які в подальшому можуть використовуватися для точного позиціонування. Важливою складовою комплексу є контроль якості спостережень на всіх етапах попередньої обробки. У 2009-2010 рр. була створена друга версія комплексу «OCTAVA_PPA», яка дозволила значно розширити його функціональні можливості.

Подальший розвиток передбачає вдосконалення існуючих, створення і впровадження нових методів і алгоритмів попередньої обробки і аналізу спостережень. Так, у 2011-2012 рр. були розроблені і протестовані новий ефективний метод і алгоритми виявлення і усунення фазових стрибків кінематичних спостережень, які дозволяють отримати надійне рішення при

частковій короткочасній втраті спостережень супутників поточного сузір'я.

Комплекс «OCTAVA_AR & POS» використовує вихідні дані ПК «OCTAVA_PPA», здійснює рішення низки допоміжних завдань і фінального завдання – точного позиціонування. Цей комплекс включає сукупність програмних модулів, головними з яких є:

- ♦ зчитування іоносферних карт IGS за допомогою Internet і подальший розрахунок трендової складової іоносферних затримок за глобальною моделлю GIM IONEX (IGS);
- ♦ згладжування кодових спостережень з використанням фазових і отримання попереднього рішення (статичного або кінематичного) дециметрового рівня точності;
- ♦ виконання РФН (дво- або одночастотних спостережень, в статичному або кінематичному режимах); верифікація (контроль якості) РФН;
- ♦ розрахунок тропосферних затримок за допомогою модифікованої моделі MOPS (RTCA DO-229D) та оцінка зенітних тропосферних затримок (ЗТЗ) за фазовими спостереженнями на базовій лінії або для мережі станцій;
- ♦ оцінка лінійних комбінацій іоносферних затримок («geometry-free»);
- ♦ формування мережевих диференціальних корекцій і їх ураухування в спостереженнях;
- ♦ виконання координатно-часових визначень (позиціонування) з використанням всіх отриманих раніше корекцій без оцінки і з оцінкою додаткових параметрів оточення (наприклад, параметрів моделі іоносферних варіацій, ЗТЗ і ін.);
- ♦ оцінка точності отриманих рішень.

У 2014-2018 рр. особлива увага приділялася вирішенню завдань створення і експериментальних досліджень алгоритмів обробки і аналізу бортових космічних GPS-спостережень для високоточного визначення параметрів руху низькоорбітальних КА і подальшого моделювання повного

електронного вмісту іоносфери. В ході експериментальних досліджень з використанням бортових GPS-вимірювань зарубіжних низькоорбітальних КА COSMIC і GRACE показане досягнення точності визначення поточних координат КА на рівні ~0,05-0,20 м (3σ) при реалізації методу PPP (Precise Point Positioning) точного автономного (недиференціального) позиціонування на інтервалах спостережень ~0,5-2 години. Надалі на основі даних досліджень планується створення додаткового комплексу «OCTAVA_PPP-LEOS», призначеного для визначення параметрів руху низькоорбітальних КА (висоти орбіт ~ 300-1500 км) з субдеціметровою/сантиметровою точністю.

Вітчизняний комплекс «OCTAVA», який був розроблений і розвивається, і який функціонує в середовищі програмування MatLab, не має аналогів в Україні, є унікальним науково-технічним продуктом багаторічної розробки і досліджень. Цей комплекс дозволив виконати цілий ряд актуальних науково-практичних досліджень в галузі розробки нових ефективних методів і алгоритмів точного позиціонування і є науковим і практичним інструментом. Створені технології двочастотного і одночастотного позиціонування сантиметрової точності є конкурентоспроможними, порівнянними за основними характеристиками з кращими закордонними аналогами в класі програмних продуктів для післясеансної обробки.

Зважаючи на викладене, при розробці ПМЗ БФСТВ планується використовувати доробок, отриманий при створенні дослідного комплексу «OCTAVA». Створення прототипу ПМЗ БФСТВ передбачається в середовищі Matlab. Після відпрацювання основних алгоритмів і програмних модулів передбачається переклад ПМЗ на мову високого рівня з можливістю роботи в реальному часі і створенням зручного інтерфейсу користувача.

10.4 Пропозиції по складу робіт в рамках ДКР в частині створення ПМЗ обробки вимірювальної інформації БФСТВ

В рамках робіт першого етапу ДКР (створення прототипу (першої черги) БФСТВ) планується виконання наступних робіт:

– участь у розробці (спільно з головною організацією та іншими організаціями-виконавцями) ескізного проекту БФСТВ, в тому числі – у проектуванні прототипу (макету) БФСТВ мінімальної конфігурації для підтвердження і демонстрації працездатності та заявленої точності траєкторних визначень БФСТВ з вибором мінімально-достатньої (для досягнення цілей даної роботи) конфігурації прототипу БФСТВ;

– узгодження з організаціями-виконавцями способів і процедур калібрування вимірювальних трактів (кодових і фазових затримок) бортової і наземної апаратури БФСТВ;

– розробка і відпрацювання алгоритмів обробки результатів вимірювань БФСТВ з урахуванням вимог затвердженого ТТЗ на БФСТВ, результатів її проектування і обраного складу прототипу;

– розробка і узгодження (спільно з іншими організаціями-виконавцями) складу і структур даних обміну інформацією між БФСТВ і споживачами її інформації;

– участь в розробці методики і програми випробувань прототипу системи і розробка методики і програмних засобів оцінки точнісних характеристик результатів вимірювань за результатами натурних випробувань; участь у проведенні полігонних випробувань прототипу БФСТВ;

– підготовка пропозицій щодо складу технічних і програмних засобів центру збору та обробки вимірювань БФСТВ і його прототипу;

– створення універсального робочого стенду відпрацювання алгоритмів обробки, розробки і випробувань ПМЗ центру збору та обробки результатів вимірювань БФСТВ і методик оцінки точнісних характеристик (закупівля технічних і програмних засобів і розробка технологічного ПЗ). В рамках робіт другого етапу ДКР (створення дослідного зразка БФСТВ) планується розробка в повному обсязі програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) збору і обробки спостережень БФСТВ в середовищі програмування С ++, включно з виконанням прецизійної координатної прив'язки і синхронізації рознесених вимірювальних пунктів системи і визначення параметрів траєкторій контрольованих об'єктів. Передбачається, що в рамках розробки ПМЗ забезпечується розробка складової – ПМЗ дослідного зразка обробки спостережень БФСТВ в режимі калібрування вимірювальних трактів системи. Відпрацювання і випробування ПМЗ виконуються на універсальному робочому стенді з використанням натурних вимірювань і експериментального підтвердження заданих характеристик точності і надійності траєкторних визначень.

Висновки

1) Представлені результати попереднього опрацювання архітектури програмно-математичного забезпечення БФСТВ для спільної обробки спостережень параметрів сигналів від контрольованих об'єктів і сигналів ГНСС і визначення параметрів руху (координат і складових вектора швидкості) контрольованих об'єктів в умовах високої динаміки зміни параметрів прийнятих сигналів БФСТВ в режимах реального часу і післясеансної обробки.

2) Визначені та деталізовані вхідні і вихідні параметри, функції і завдання ПМЗ, наведені методи і функції алгоритмів обробки спостережень.

3) Визначені етапи розробки ПМЗ БФСТВ.

11 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ВИБРАНИХ GPS-СУПУТНИКІВ З ПОТОЧНОГО РОБОЧОГО СУЗІР'Я ТА ОЦІНКА ЇХ КООРДИНАТ

У даному розділі представлено короткий опис попередньої математичної моделі спостережень БФСТВ для підтвердження її працездатності і точності траєкторних визначень з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України. Приведені результати експериментальних досліджень та тестових випробувань прототипу програмно-математичного забезпечення БФСТВ. Показано, що результати апостеріорної оцінки точності траєкторних визначень координат супутників, що отримані в ході обробки реальних GPS-спостережень, близько співпадають з апріорними оцінками точності БФСТВ, які були отримані з використанням моделі похибок системи.

11.1 Постановка задачі

Одна з найважливіших особливостей підходу до створення БФСТВ і проведення досліджень полягає в доказі (шляхом теоретичних досліджень і моделювання з використанням реальної вимірювальної інформації):

1) працездатності принципів побудови системи;

2) можливості надійної обробки одночасних кодових і фазових спостережень наземних приймачів інтерферометра БФСТВ по сигналах ВДЛА/КА (контрольованих об'єктів – КО) і сигналів GPS і визначення однозначних різниць відстаней на трасах «КО – наземні приймачі» з сантиметровою точністю;

3) визначення параметрів траєкторій КО з потенційно можливою точністю для заданої геометрії «КО – БФСТВ».

В цьому випадку похибки оцінювання напрямних косинусів КО щодо БФСТВ будуть відповідати заданим характеристикам на максимальних віддаленнях КО від приймачів інтерферометра системи.

Таким чином, ставиться задача моделювання обробки результатів спостережень обраних (одного-двох) GPS-супутників (як КА, параметри траєкторій яких визначаються) з поточного робочого сузір'я супутників і оцінити їх поточні координати і складові вектора швидкості, зіставивши результати апостеріорної і апріорної оцінок точності БФСТВ, для експериментального підтвердження працездатності принципу побудови траєкторної системи і можливості досягнення потенційних характеристик точності БФСТВ відповідно до результатів апріорної оцінки точності з використанням моделі похибок спостережень.

Апостеріорна оцінка точності БФСТВ в даному випадку повинна бути отримана шляхом порівняння оцінок параметрів траєкторій КА (обраного супутника GPS) і точних ефемерид для цих же супутників, отриманих від міжнародної служби IGS. Такий підхід дозволить (при відсутності можливості проведення натурного макетування системи) достовірно довести не тільки принципову можливість реалізації БФСТВ, але й можливість досягнення заявленої точності траєкторних вимірювань на видаленні КА до ~20–25 тис. км від наземного інтерферометра системи, розгорнутого на території України.

В ході експерименту були виконані наступні роботи:

– створена попередня математична модель двочастотних кодових і фазових спостережень БФСТВ з урахуванням особливостей GPS-спостережень, адаптована для проведення експерименту, що виконується;

– створений прототип (експериментальний зразок) програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) післясеансної обробки спостережень БФСТВ для траєкторних визначень КА (обраних GPS-супутників);

– проведені тестові випробування прототипу ПМЗ з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України – проведено моделювання обробки результатів спостережень обраних з поточного робочого сузір'я GPS-супутників (як контрольованих КА) і оцінки їх поточних координат і складових вектора швидкості;

– виконано порівняння результатів апріорної і апостеріорної оцінок точності БФСТВ для експериментального підтвердження працездатності принципу побудови БФСТВ і можливості досягнення потенційних характеристик точності БФСТВ (згідно з результатами апріорної оцінки точності).

Відзначимо наступні важливі положення при формуванні математичної моделі спостережень БФСТВ в цілому – як з урахуванням GPS-спостережень, так і кодових і фазових спостережень КА:

1) припускаємо, що кожен приймач інтерферометра БФСТВ (з однією і тією ж приймальні антеною L-діапазону) включає в себе дві складові – аналогову і цифрову частину одночасного прийому сигналів КА і сигналів GPS;

2) вважаємо, що кодові і фазові GPS-спостереження використані для оцінки з високою точністю (СКП/ $RMS_{\bar{x}} \leq 1$ см) координат середніх фазових центрів (с.ф.ц.) приймальних антен вимірювальних пунктів (ВП) інтерферометра БФСТВ (в системі координат ITRFXXXX), тобто вважаємо, що після калібрування апаратури БФСТВ координати всіх с.ф.ц. ВП-ів (на всіх частотах L-діапазону) відомі з необхідною точністю;

3) вважаємо, що на кожному ВП-і інтерферометра БФСТВ оцінені на заданому інтервалі часу поточні зенітні тропосферне затримки (ЗТЗ) (методом PPP і диференціальним методом) з похибками ~ 5–10 мм (СКП/RMS) для будь-якого моменту часу із заданого інтервалу;

4) вважаємо, що кодові і фазові GPS-спостереження приймальної частини ВП-ів використовуються для цілочисельного/дискретного РФН (одинарних різниць фазових спостережень) для кожного з проходів супутників GPS і для кожної вимірювальної бази (з урахуванням відомих точних ефемерид супутників GPS і координат с.ф.ц. приймальних антен ВП-ів інтерферометра) і подальшої відповідної корекції рівнянь GPS-спостережень на оцінені фазові цикли, а також на оцінки різниць відстаней на трасах «GPS-супутники – ВП-и» інтерферометра;

5) вважаємо, що кодові і фазові КА-спостереження приймальної частини ВП-ів вітчизняної розробки використовуються для цілочисельного/дискретного РФН (одинарних різниць фазових спостережень) для кожної вимірювальної бази (з урахуванням відомих координат с.ф.ц. приймальних антен ВП-ів інтерферометра і з урахуванням відомих оцінок ЗТЗ) і подальшої відповідної корекції рівнянь КА-спостережень на оцінені фазові цикли;

6) вважаємо, що всі кодові і фазові спостереження (як GPS-спостереження, так і КА-спостереження) приймальної частини ВП-ів приведені в ході пре-процесингу на одні й ті ж рівнодискретні (наприклад, секундні) відліки часу в шкалі часу GPS;

7) математична модель рівнянь спостережень інтерферометра враховує тільки одинарні різниці кодових і фазових спостережень за сигналами КА; в модель також вводяться рівняння кодових відстаней на трасах «наземний передавач БФСТВ – КА»; передбачається, що затримка сигналу запиту в апаратурі трансивера на борту КА відкалібрована з субдециметровою

точністю. У експерименті були використані GPS-добові спостереження (10 січня 2013 т.) **11** перманентних референцних станцій ГНСС-мережі України з головною станцією GLSV (Київ).

11.2 Апріорна оцінка точності визначення координат КА (вибраного супутника GPS)

11.3.1 Апріорна і апостеріорна оцінки точності визначення координат КА (вибраного супутника GPS) виконувалась для наступних режимів функціонування БФСТВ:

1) далекомірно-інтерферометричний (запитний) режим функціонування системи (кодові C1P2 спостереження відстаней + кодові C1P2 спостереження різниць відстаней);

2) інтерферометричний (беззапитний) режим функціонування системи (кодові C1P2 спостереження тільки різниць відстаней);

3) далекомірно-інтерферометричний (запитний) режим функціонування системи (кодові C1 спостереження відстаней + кодові C1 спостереження різниць відстаней) – режим був реалізований тільки для апостеріорної оцінки точності;

4) інтерферометричний (беззапитний) режим функціонування системи (кодові C1 спостереження тільки різниць відстаней) – режим був реалізований тільки для апостеріорної оцінки точності;

5) далекомірно–інтерферометричний (запитний) режим функціонування системи (кодові спостереження відстаней + фазові спостереження різниць відстаней) – найбільш точний режим траєкторних визначень; оцінки складових вектору швидкості (СКШ) КА були виконані тільки для даного п’ятого, найбільш точного, режиму функціонування БФСТВ);

6) інтерферометричний (беззапитний) режим функціонування системи (тільки фазові спостереження різниць відстаней).

В ході досліджень були виконані оцінки точності з використанням кодових спостережень двох видів – 1) стандартних безіоносферних чисто кодових спостережень C1P2 та 2) більш точних безіоносферних кодово-фазових спостережень C1. У останньому випадку іоносферні затримки в кодових спостереженнях були скореговані з використанням безгеометричних фазових лінійних комбінацій двох частот та відомих процедур «levelling» сумісної фільтрації кодових спостережень з використанням фазових.

11.3.2 Розглянемо задачу моделювання обробки результатів спостережень обраних (одного-двох) GPS-супутників (як КА, параметри траєкторій яких визначаються) з поточного робочого сузір'я супутників і оцінки їх поточних координат і складових вектора швидкості, зіставивши результати апостеріорної і апріорної оцінок точності БФСТВ.

Першим етапом вирішення задачі є реалізація апріорної оцінки точності параметрів руху КА з використанням простої моделі похибок спостережень.

Загальний вигляд геометрії вимірювань «БФСТВ – КА» (у реальному масштабі співвідношень базових ліній на території України та відстаней до КА) представлений на рис. 11.1.

Рис. 11.1 – Загальний вигляд геометрії вимірювань «БФСТВ – КА»

Конфігурація вимірювальних пунктів БФСТВ зображена на рис. 11.2. В якості пунктів БФСТВ були вибрані перманентні станції України. Пункт GLSV вибраний в якості центрального пункту (master-станція). Координати пунктів БФСТВ наведені у табл. 11.1, відстані між пунктами наведені у табл. 11.2.

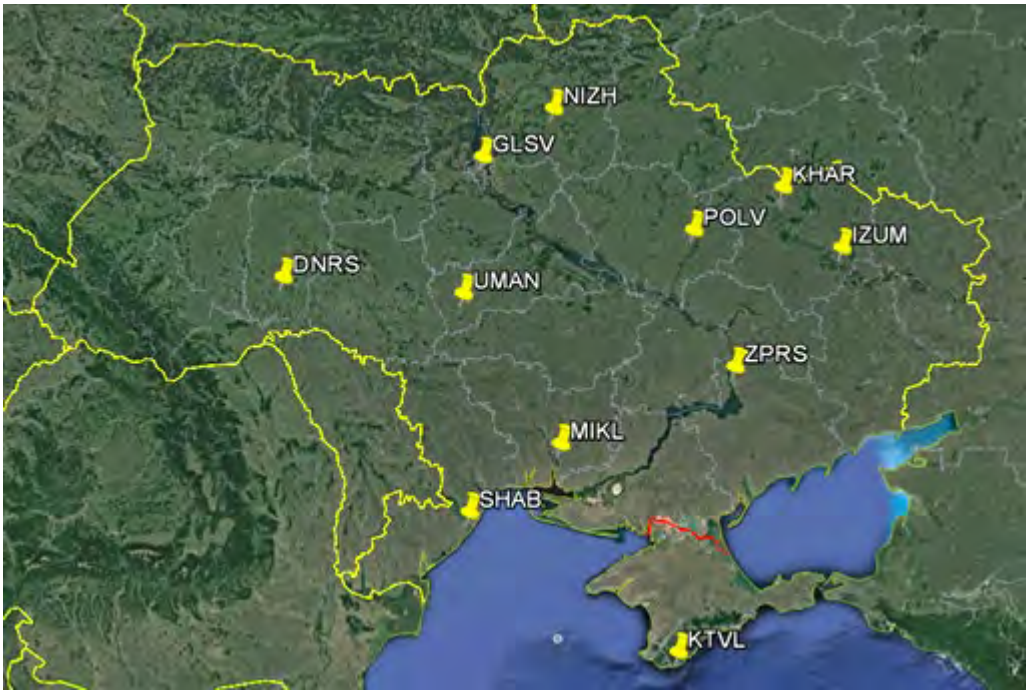


Рис. 11.2 – Конфігурація вимірювальних пунктів БФСТВ

Таблиця 11.1 – Координати вимірювальних пунктів БФСТВ

№	ВП/ станція	Місцеположення (місто)	Довгота, град.	Широта, град.	Висота, м
1	**GLSV**	**Київ (Голосієво)**	50.36418	30.49673	226.3716
2	**DNRS**	**Дунаївці, Хмельницька обл.**	48.85459	26.71261	396.1397
3	**IZUM**	**Ізюм, Харківська обл.**	49.19221	37.27743	107.5446
4	**KHAR**	**Харків**	50.0051	36.23901	201.0888
5	**KTVL**	**Кацівелі (пгт, Крим)**	44.39289	33.96947	67.42583
6	**MIKL**	**Миколаїв**	46.97279	31.97284	93.98358
7	**NIZH**	**Ніжин, Чернігівська обл.**	51.0225	31.88346	168.4416
8	**POLV**	**Полтава**	49.60261	34.54293	178.4569
9	**SHAB**	**Шабо, Одеська обл.**	46.1432	30.37357	58.65201
10	**UMAN**	**Умань**	48.73148	30.19819	258.5658
11	**ZPRS**	**Запоріжжя**	47.82872	35.16148	93.67798

Як видно з таблиці 11.2, максимальна відстань між вимірювальними пунктами становить ~772.5 км (база DNRS – IZUM в напрямку «захід – схід»). Максимальна відстань в напрямку «північ – південь» становить ~753 км (база NIZH – KTVL).

Таблиця 11.2 – Відстані між пунктами БФСТВ (в кілометрах)

	GLSV	DNRS	IZUM	KHAR	KTVL	MIKL	NIZH	POLV	SHAB	UMAN	ZPRS
GLSV		320.8	505.2	411.9	713.2	392.4	122.3	302.2	469.3	182.9	442.0
DNRS	320.8		772.5	702.0	743.9	445.2	442.4	575.9	408.5	256.4	636.0
IZUM	505.2	772.5		117.5	589.9	465.7	436.0	203.7	618.9	520.6	217.8
KHAR	411.9	702.0	117.5		646.9	461.4	328.9	130.0	612.2	460.8	254.6
KTVL	713.2	743.9	589.9	646.9		326.2	753.0	580.6	342.7	562.0	392.8
MIKL	392.4	445.2	465.7	461.4	326.2		450.3	349.0	153.4	236.4	258.8
NIZH	122.3	442.4	436.0	328.9	753.0	450.3		246.6	553.7	282.1	427.3
POLV	302.2	575.9	203.7	130.0	580.6	349.0	246.6		494.9	331.2	202.4
SHAB	469.3	408.5	618.9	612.2	342.7	153.4	553.7	494.9		288.1	409.4
UMAN	182.9	256.4	520.6	460.8	562.0	236.4	282.1	331.2	288.1		381.7
ZPRS	442.0	636.0	217.8	254.6	392.8	258.8	427.3	202.4	409.4	381.7	

Використані для розрахунків значення середньоквадратичних похибок вимірювань (спрощена модель похибок вимірювань БФСТВ):

$$\sigma_R = 1\,м\ ;\ \sigma_q = 0.01\,м\ ;\ \sigma_{\dot{R}} = 0.01\,м/с\ ;\ \sigma_{\dot{q}} = 0.001\,м/с\ ;\ \beta_{\min} = 10^\circ .$$

Перелік позначень

Тип БФСТВ [1]:

1 – сумарно–різнице–далекомірний (далекомірно-інтерферометричний запитний режим функціонування системи);

2 – різнице–далекомірний (інтерферометричний беззапитний режим функціонування системи);

3 – сумарно–далекомірний (запитний режим функціонування системи).

ВП – вимірювальний пункт;

ГСК – геоцентрична (Грінвічська) система координат;

МСК – місцева система координат;

СВШ – складові вектору швидкості .

Для моделювання роботи БФСТВ використовувалися реальні добові спостереження зазначених перманентних GPS-станцій за 10 січня 2013 р. На рис. 11.3 представлені інтервали видимості та значення геометричних факторів і кількості супутників робочого сузір'я, що спостерігається на станції GLSV на добовому інтервалі.

Геометричні характеристики спостережень станції GLSV

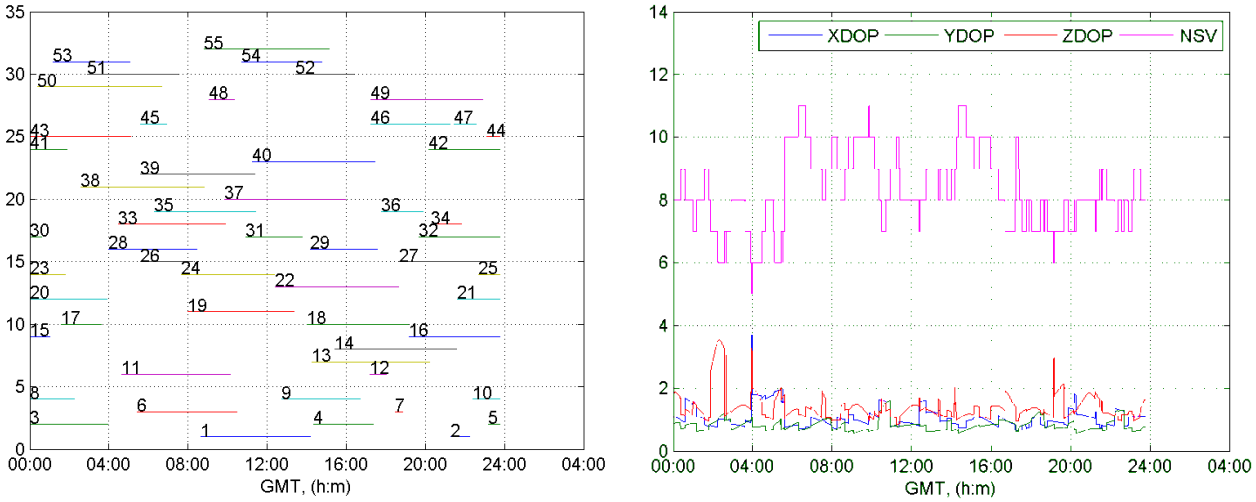


Рис. 11.3

Один із супутників GPS був обраний в якості контрольованого об'єкта з невідомими параметрами руху і його координати і складові вектора швидкості визначалися за спостереженнями БФСТВ.

Нижче представлені результати апріорної оцінки точності різних типів функціонування БФСТВ для одного з проходів супутників GPS, а саме, супутника PRN 23 на інтервалі 11:16 – 17:37 годин.

На рис. 3.4 для супутника PRN 23 представлені «рисунок неба» (Sky Plot), кут місця і відстань супутника від центрального пункту, а також кути місця всіх пунктів БФСТВ.

На рис. 11.5 представлені результати (СКП) апріорної оцінки точності визначень координат КА, а на рис. 11.6 – СКП складових вектору швидкості (СВШ) КА.

В табл. 11.3,113.4 наведені результати апріорної оцінки точності координат та СВШ (діапазони змін СКП у плані та по висоті) для різних умов. Дані мають такий вигляд

$$\left[\sigma_{\min}^{plan} - \sigma_{\max}^{plan} \,/\, \sigma_{\min}^{height} - \sigma_{\max}^{height}\right].$$

Геометричні характеристики спостережень для вибраного проходу супутника GPS PRN 23

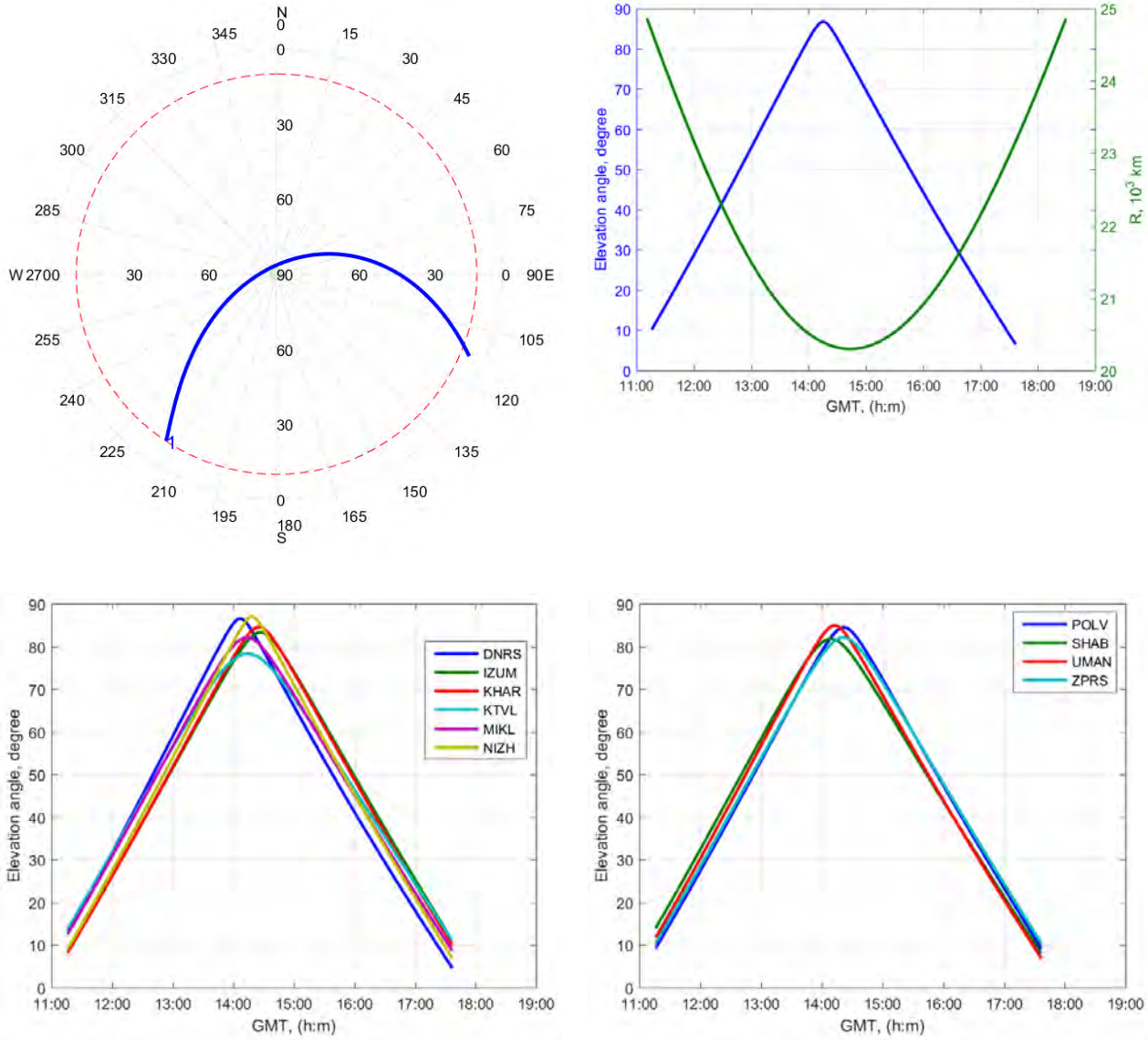


Рис. 11.4

Апріорні оцінки похибок (СКП) визначення координат КА PRN 23

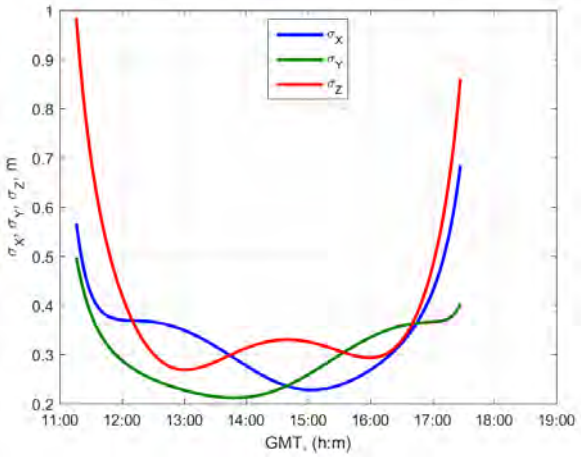
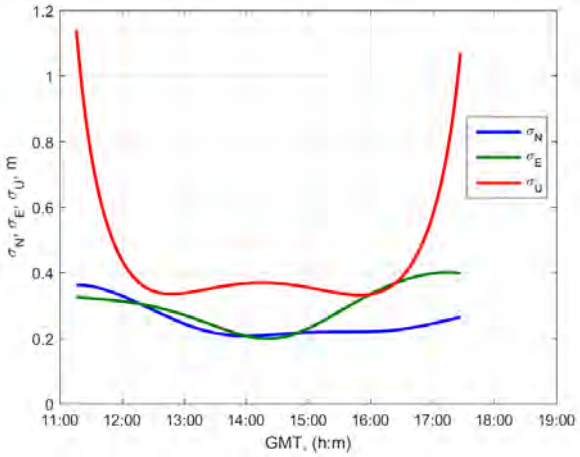
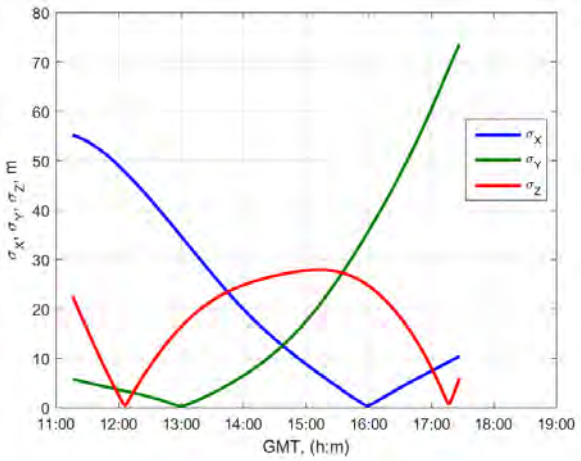
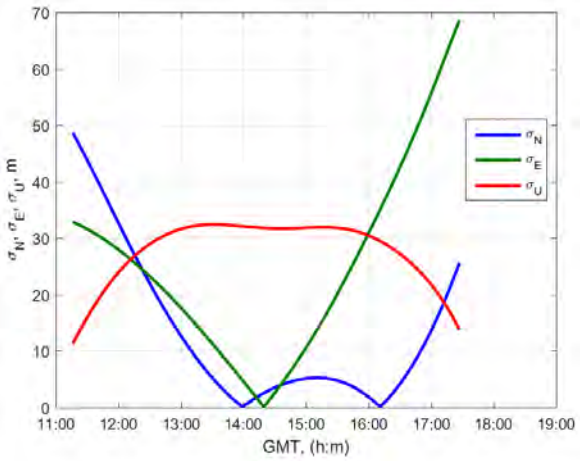
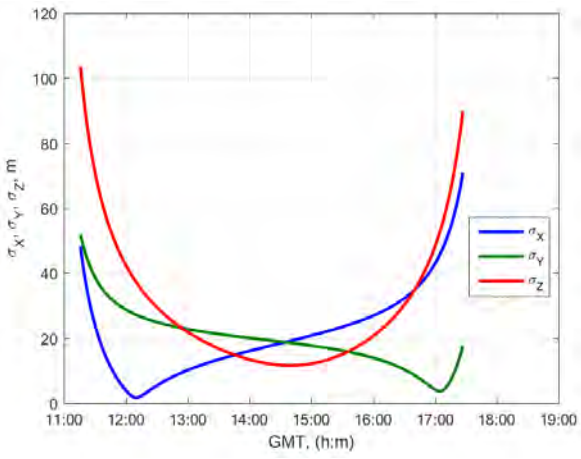
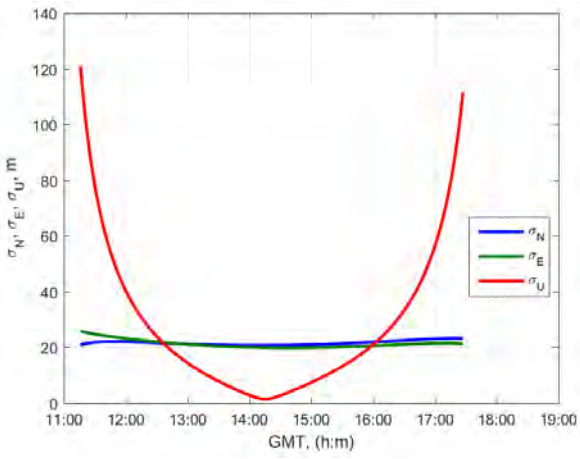
	ГСК	МСК
1		
2		
3		

Рис. 11.5

Апріорні оцінки похибок (СКП) визначення СВШ КА PRN 23

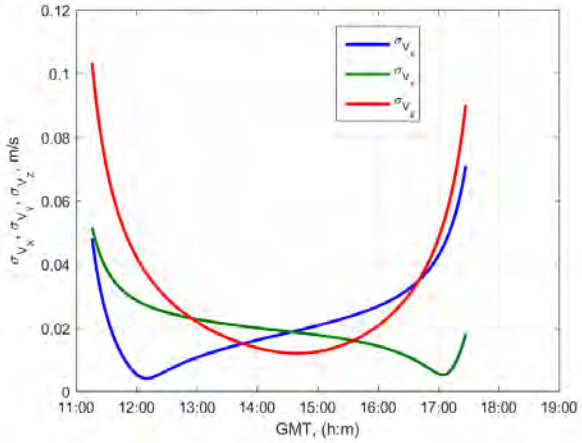
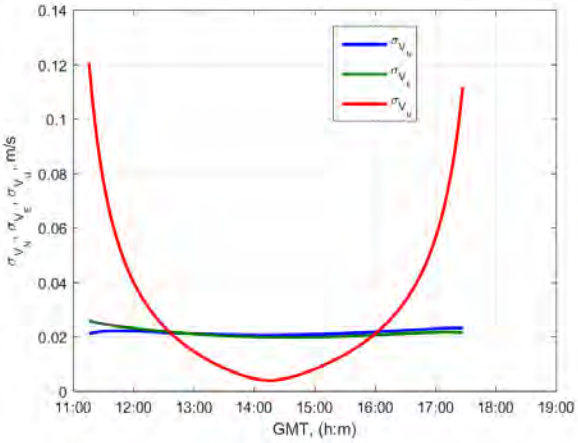
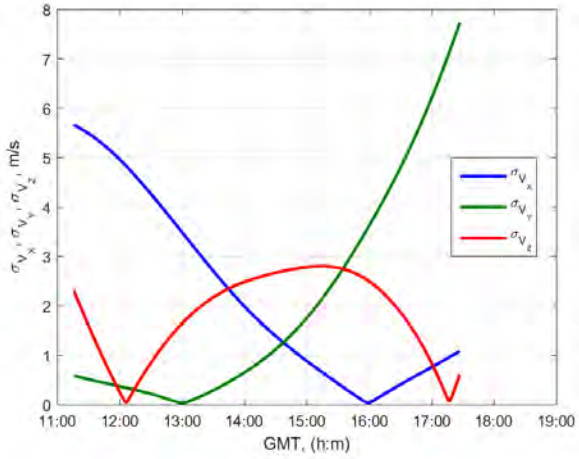
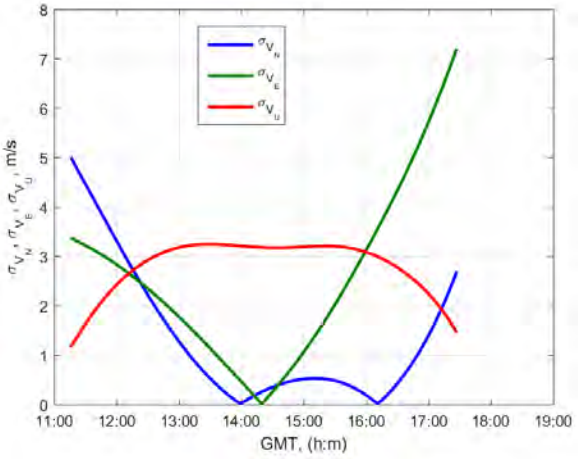
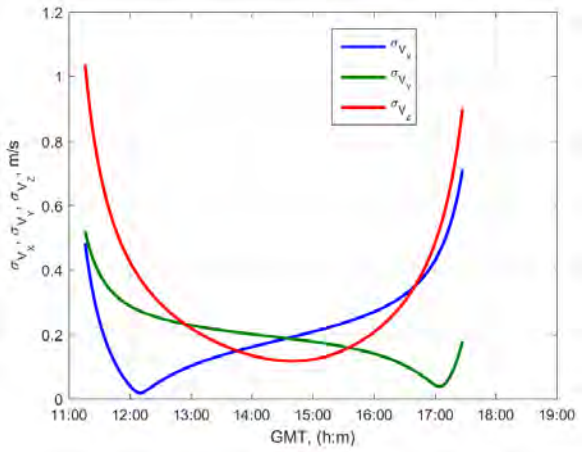
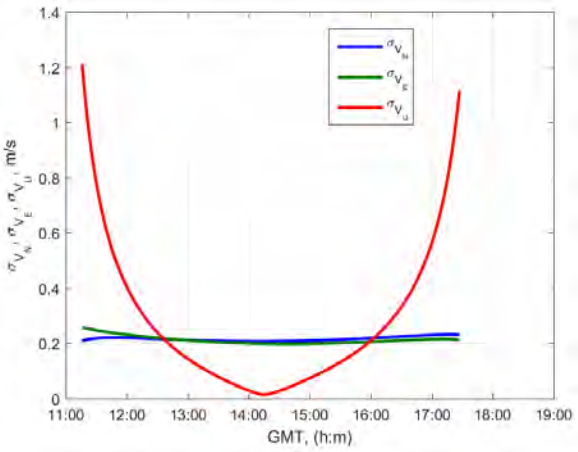
	ГСК	МСК
1		
2		
3		

Рис. 11.6

Таблиця 11.3 – Апріорна оцінка точності визначення координат КА PRN 23 (СКП, м)

Тип системи	Кути місця 10°–30°	Кути місця 30°–90°
1	0.3 – 0.6 / 0.4 – 1.10	0.3 – 0.5 / 0.3 – 0.4
2	8 – 74 / 9 – 33	0.3 – 55 / 24 – 36
3	29 – 39 / 36 – 121	29 – 32 / 1.5 – 38

Таблиця 11.4 – Апріорна оцінка точності визначення СВШ КА PRN 23 (СКП, м/с)

Тип системи	Кути місця 10°–30°	Кути місця 30°–90°
1	0.03 – 0.04 / 0.04 – 0.12	0.03 – 0.035 / 0.004 – 0.04
2	4 – 8 / 1.0 – 3.3	0.2 – 6 / 2.4 – 3.7
3	0.3 – 0.4 / 0.4 – 1.2	0.3 – 0.33 / 0.014 – 0.42

11.3 Апостеріорна оцінка точності визначення параметрів траєкторії супутника GPS PRN 23 по реальним спостереженням БФСТВ – результати експериментальних досліджень

11.3.1 В ході експерименту були виконані наступні роботи:

1) розроблені та експериментально верифіковані методи і алгоритми обробки спостережень обраного КА і синхронних спостережень GPS, включаючи

– високоточну синхронізацію шкал часу рознесених в просторі наземних приймачів-станцій БФСТВ з використанням сигналів GPS;

– метод дискретного (цілочисельного) розрізнення фазових неоднозначностей (РФН) на великих базових відстанях (до ~800 км) між станціями інтерферометра БФСТВ,

– алгоритми визначення параметрів траєкторій КА;

– вибір і експериментальну верифікацію методів оцінки тропосферних і іоносферних затримок сигналів БФСТВ і GPS.

2) створено прототип (експериментальний зразок) програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) післясеансної обробки спостережень БФСТВ для траєкторних визначень КА;

3) проведені тестові випробування прототипу ПМЗ з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України – проведено моделювання обробки результатів спостережень обраних з поточного робочого сузір'я GPS-супутників (як контрольованих КА) і оцінки їх поточних координат і складових вектора швидкості;

4) виконана оцінка параметрів траєкторій КА (обраних GPS-супутників) і виконано порівняння результатів апріорної і апостеріорної оцінок точності БФСТВ для експериментального підтвердження працездатності принципу побудови БФСТВ і можливості досягнення потенційних характеристик точності БФСТВ (згідно з результатами апріорної оцінки точності).

11.3.2 Вибрані спостереження (за 10 січня 2013 р.) пройшли попередню обробку (контроль якості даних, усунення циклічних фазових стрибків і ін.) з використанням модернізованого під цю задачу програмного комплексу. В якості еталонних значень при апостеріорної оцінки точності координатних рішень були використані прецизійні оцінки координат супутників GPS, що надаються службою IGS.

Нижче на наступних рис. 11.7 – 11.12 наведені приклади-ілюстрації

отриманих експериментальних результатів. На зазначених рисунках показані:

– кути місця (кутові градуси) спостережень сузір'я GPS-супутників (КА – супутник PRN 23, показаний жовтим кольором) з станції GLSV (рис. 11.7);

– оцінки розходжень шкал часу (у метрах) між станціями – «знизу – до верху» для баз між станціями DNRS, IZUM, KHAR, KTVL, MIKL, NIZH, POLV, SHAB, UMAN, ZPRS та GLSV (рис. 11.8) ;

– оцінки відхилень (сумісно та окремо з штучним розносом) (у метрах) сформованих у процесі обробки однозначних фазових IF-спостережень (одинарні різниці відстаней між станціями) від еталонних одинарних різниць відстаней між станціями (еталонні значення вирахувані по точним ефемеридам IGS) – «знизу – до верху» для баз між станціями DNRS, IZUM, KHAR, KTVL, MIKL, NIZH, POLV, SHAB, UMAN, ZPRS та GLSV (рис. 11.9);

– оцінки (рис. 11.10) відхилень (у метрах) оцінок координат КА від його еталонних значень (вирахувані по точним ефемеридам IGS):

а) зверху – до низу, лівий стовпчик – рисунки для режимів функціонування БФСТВ 1), 3), 5);

б) зверху – до низу, правий стовпчик – рисунки для режимів функціонування БФСТВ 2), 4), 6);

– оцінки (рис. 11.11, 11.12) відхилень (у метрах) оцінок координат (рис. 11.11) та СВШ (рис. 11.12) КА від його еталонних значень (вирахувані по точним ефемеридам IGS) – у збільшеному масштабі.

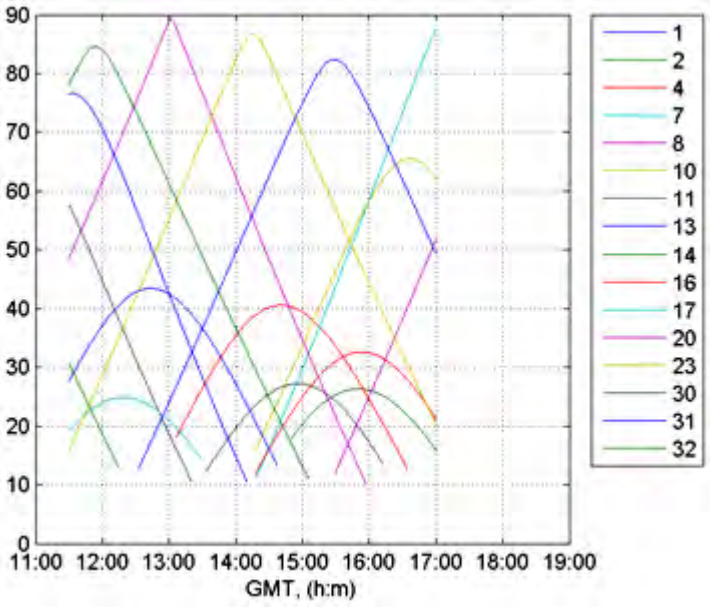


Рис. 11.7

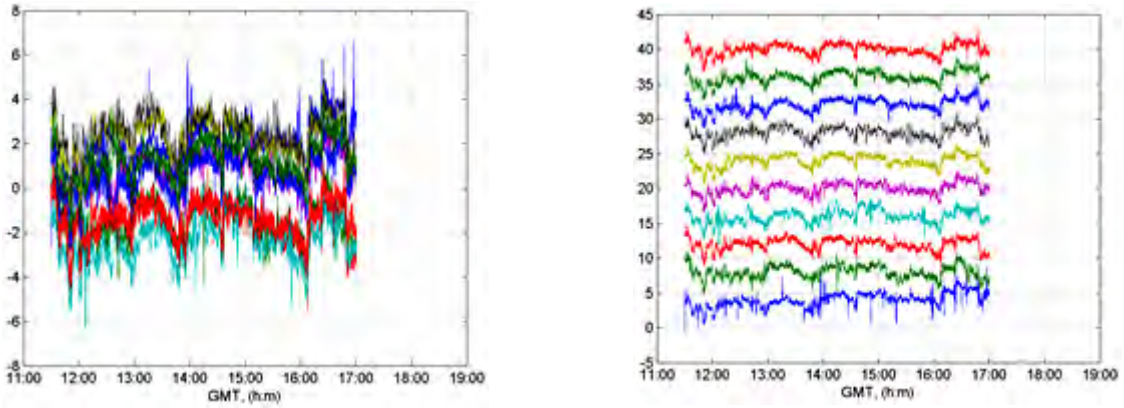


Рис. 11.8

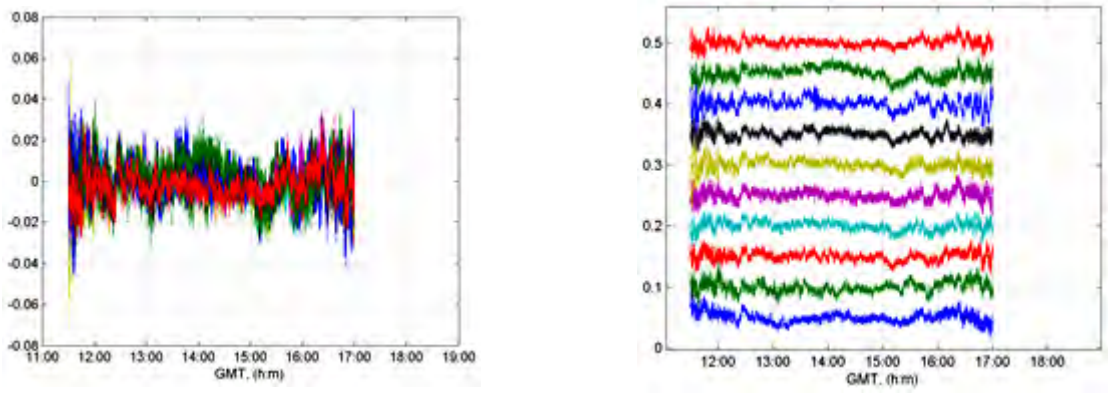


Рис. 11.9

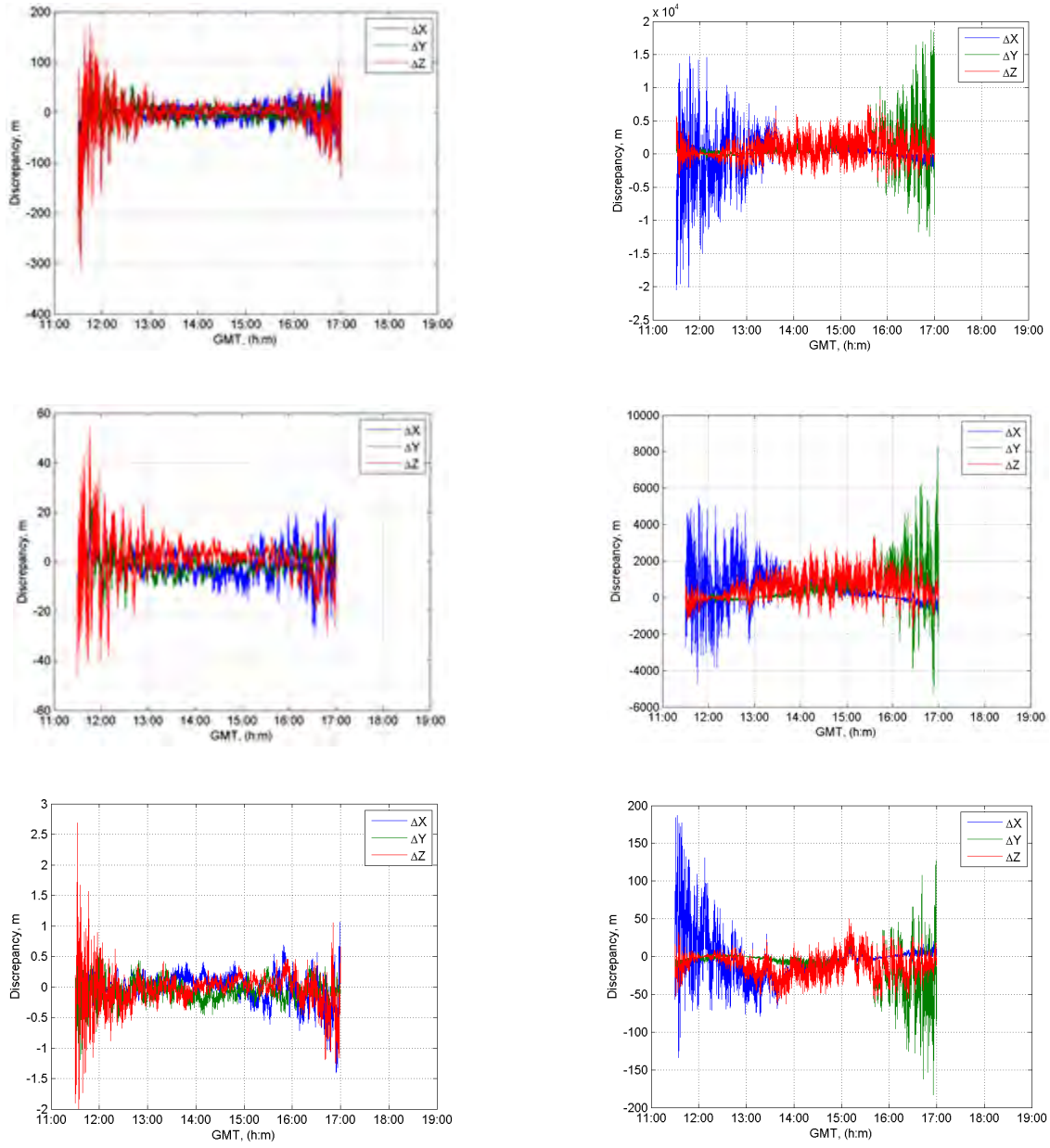


Рис. 11.10

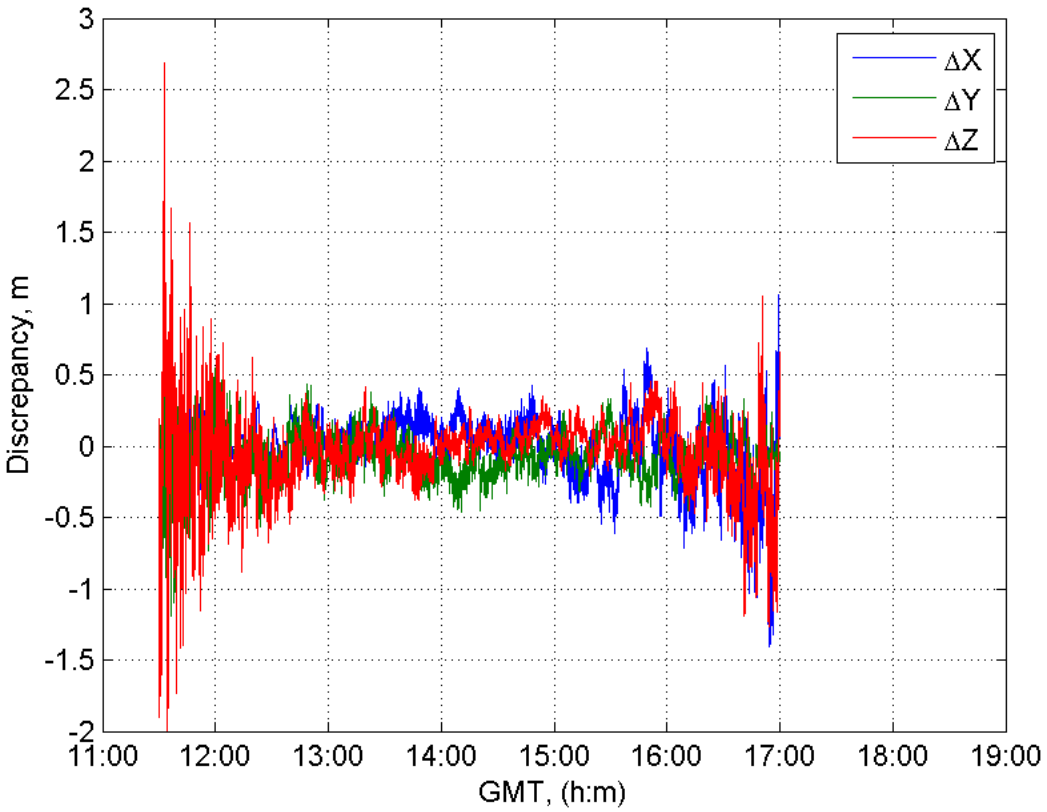


Рис. 11.11

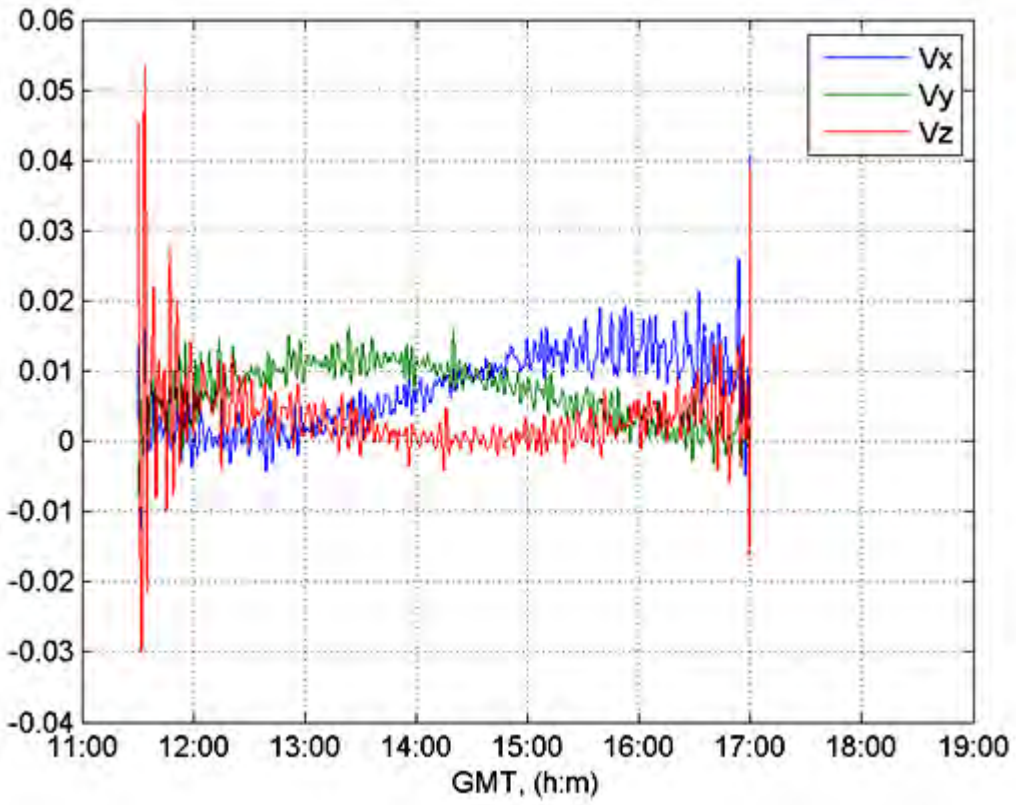


Рис. 11.12

Таблиця 11.5 – Апостеріорна оцінка точності визначення координат КА PRN 23 (СКП, м)

Тип системи	**Кути місця 15°–35°**	**Кути місця 35°–90°**
1	**~0.45**	**~0.16**
2	**~25 – 50**	**~21**
3	**~34 – 70 (C1P2) / ~8 – 14 (C1)**	**~7 – 10 (C1P2) / ~3.5 – 6.0 (C1)**

Таблиця 11.6 – Апостеріорна оцінка точності визначення СВШ КА PRN 23 (СКП, м/с) (оцінка точності СВШ виконана тільки для першого типу БФСТВ)

Тип системи	**Кути місця 15°–35°**	**Кути місця 35°–90°**
1	**~0,01**	**~0,007**

Апостеріорна оцінка точності з використанням прототипу ПМЗ показала можливість досягнення наступної точності траєкторних визначень КА (супутників GPS в якості об'єктів, що контролюються):

– у далекомірно–інтерферометричному (запитному) режимі функціонування системи (БФСТВ першого типу – кодові спостереження відстаней + фазові спостереження різниць відстаней) СКП визначення поточних координат супутників (точкові оцінки с темпом 1 Гц) лежать в межах від **~0.16 м** (планові координати) до **~0.45 м** (висота);

– значення СКП складових вектору швидкості супутників (оцінка точності СВШ виконана тільки для першого типу БФСТВ) лежать в межах **~0,7–1,0 см/с**;

– у інтерферометричному (беззапитному) режимі функціонування системи (система другого типу – тільки фазові спостереження різниць відстаней) значення СКП визначення поточних координат супутників лежать в межах від **~21 м** (планові координати) до **~25–50 м** (висота).

Апостеріорна оцінка точності визначення координат також виконувалась для систем другого та третього типу (1-й, 2-й, 3-й, 4-й режими функціонування БФСТВ) з використанням тільки кодових спостережень двох видів – стандартних безіоносферних чисто кодових спостережень C1P2 та більш точних безіоносферних кодово-фазових спостережень C1. У останньому випадку іоносферні затримки в кодових спостереженнях скореговані з використанням безгеометричних фазових лінійних комбінацій двох частот та відомих процедур «levelling» сумісної фільтрації кодових спостережень з використанням фазових.

Результати апостеріорної оцінки точності для останніх випадків такі:

– у далекомірно–інтерферометричному режимі функціонування системи (кодові C1P2 спостереження відстаней + кодові C1P2 спостереження різниць відстаней) СКП визначення поточних координат супутників лежать в межах від **~7 м** (планові координати) до **~50 м** (висота); якщо використовуються кодові C1 спостереження відстаней + кодові C1 спостереження різниць відстаней точність траєкторних визначень зростає суттєво – приблизь у три рази;

– у інтерферометричному (беззапитному) режимі функціонування системи (кодові C1P2 спостереження тільки різниць відстаней) значення СКП становляться неприпустимими – лежать в межах від **~1.5 км** до **~7 км**; якщо використовуються кодові C1 спостереження різниць відстаней точність траєкторних визначень зростає і СКП оцінок координат лежать в межах від **~0,7–1.0 км** до **~2–3 км**.

Порівняльний аналіз результатів апріорної та апостеріорної оцінок точності БФСТВ в рамках даного експерименту показав, що ці результати

досить близько співпадають, хоча оцінки траєкторних визначень за реальними вимірюваннями виявилися більш точними.

В цілому, отримані експериментальні результати цілком підтверджують правильність концепції побудови, функціонування БФСТВ, а також її працеспроможність.

Висновки до розділу

1) Представлено опис математичної моделі спостережень БФСТВ для підтвердження її працездатності і точності траєкторних визначень з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України. Приведені результати експериментальних досліджень та тестових випробувань прототипу програмно-математичного забезпечення БФСТВ, що підтвердили правильність концепції побудови і функціонування БФСТВ, а також працездатність системи.

2) Створений прототип (експериментальний зразок) програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) післясеансної обробки спостережень БФСТВ для траєкторних визначень КА (обраних GPS-супутників). Проведені тестові випробування прототипу ПМЗ з використанням реальних GPS-спостережень перманентних референцних станцій України – проведено моделювання обробки результатів спостережень обраних з поточного робочого сузір'я GPS-супутників (як контрольованих КА) і оцінки їх поточних координат і складових вектора швидкості з одночасною оцінкою розбіжностей шкал часу рознесених в просторі приймачів інтерферометра БФСТВ.

3) Проведена апріорна оцінка точності визначення координат і складових вектора швидкості КА для різних типів БФСТВ (сумарно–різнице–далекомірний, різнице–далекомірний і сумарно–далекомірний).

При використанні повнофункціональної БФСТВ першого (далекомірно–інтерферометричного) типу досягається найбільша точність – похибки (СКП) визначення координат складають **~0.3–0.6 м** (планові

координати) і **~1.5 м** (висота). Похибки визначення висоти значно зростають для КА зі зменшенням кута місця.

Для БФСТВ другого (інтерферометричного) типу похибки визначення координат набагато вище і можуть становити десятки метрів, особливо для низьких супутників. Для БФСТВ третього типу похибки визначення координат ще вище.

Похибки (СКП) визначення складових вектору швидкості складають кілька сантиметрів в секунду для БФСТВ першого типу і від кількох дециметрів в секунду до декількох метрів в секунду для БФСТВ другого і третього типів.

4) Апостеріорна оцінка точності з використанням прототипу ПМЗ показала можливість досягнення наступної точності траєкторних визначень КА (супутників GPS в якості об'єктів, що контролюються):

– у далекомірно–інтерферометричному (запитному) режимі функціонування системи (БФСТВ першого типу) СКП визначення поточних координат супутників (точкові оцінки с темпом 1 Гц) лежать в межах від **~0.16 м** (планові координати) до **~0.45 м** (висота); значення СКП складових вектору швидкості супутників лежать в межах **~0,7–1,0 см/с**;

– у інтерферометричному (беззапитному) режимі функціонування системи (система другого типу) значення СКП визначення поточних координат супутників лежать в межах від **~21 м** (планові координати) до **~25–50 м** (висота).

Отримані експериментальні результати цілком підтверджують правильність концепції побудови, функціонування БФСТВ, а також її працеспроможність. Результати апостеріорної оцінки точності траєкторних визначень координат супутників, що отримані в ході обробки реальних GPS-спостережень, близько співпадають з апріорними оцінками точності БФСТВ, які були отримані з використанням моделі похибок системи.

ВИСНОВКИ

ЩОДО ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ФАЗОВОЇ СИСТЕМИ ТРАЄКТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ

1. Виконано науково-технічне обгрунтування багатопозиційної фазової системи траєкторних вимірювань (БФСТВ); розроблено архітектуру програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) післясеансної обробки спостережень БФСТВ; створено прототип ПМЗ БФСТВ; проведено обробку результатів спостережень вибраних GPS-супутників з поточного робочого сузір'я, виконано оцінку їх координат, підтверджено можливість досягнення заданих характеристик точності системи траєкторних вимірювань.

2. Показано, що з використанням прототипу цього ПМЗ точність траєкторних визначень супутників GPS в якості об'єктів, траєкторії яких контролюються БФСТВ, така:

– у далекомірно–інтерферометричному (запитному) режимі функціонування системи середньоквадратичні похибки (СКП) визначення поточних координат супутників (точкові оцінки с темпом 1 Гц) лежать в межах від ~0.16 м (планові координати) до ~0.45 м (висота);

– у інтерферометричному (беззапитному) режимі функціонування системи значення СКП визначення поточних координат супутників лежать в межах від ~21 м (планові координати) до ~25–50 м (висота).

3. Отримані експериментальні результати цілком підтверджують правильність концепції побудови, функціонування БФСТВ, а також її працездатність. Результати апостеріорної оцінки точності траєкторних визначень координат супутників, що отримані в ході обробки реальних GPS-спостережень, близько співпадають з апріорними оцінками точності БФСТВ, які були отримані з використанням моделі похибок системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Астрономічний енциклопедичний словник / За загальною редакцією Ш.А. Климишина та А. О. Корсунь. – Львів, 2003. – 548 с.

2. Бакут П. А., Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника, 1987, №10, С. 104-112.

3. Бахвалов Н. Численные методы / Жидков Н., Кобельков Г. // Бином. Лаборатория знаний – 2011 – С. 640

4. 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. // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків: ХУПС, 2012. – Вип. 7(105). – С. 44 – 50.

5. Белоус Н.В. Удаление низкочастотной составляющей изображения с использованием медианного фильтра / Н.В. Белоус, А.И. Красов, В.П. Власенко // Журнал інж. наук. Комп. інженерія. – 2016. – №3 (2) – С. 7 – 14.

6. Бодин Н.А., Оценка параметров распределения по группированным выборкам, Тр. МИАН СССР, 1970, том 111, 110–154.

7. Вентцель, Е. С. Теория вероятности и ее инженерные приложения [Текст]: учеб. пособие для втузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 2-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2000. — 480 с.

8.. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия / Под ред. Ю.В.Прохорова. – М.: Большая российская энциклопедия – 2003 г. – 912 с.

9. Власенко В.П. Яркостное выравнивание астрономических изображений с использованием медианного фильтра / В.П. Власенко, В.Е. Саваневич, А.В. Погорелов, А.Б. Брюховецкий // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника» – 2016. – №185 – С. 70 – 80.

10. Вудс Р., Гонсалес Р.. Цифровая обработка изображений / Вудс Р., Гонсалес Р. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

11. Гальярди Р.М. Оптическая связь / Р.М. Гальярди, Ш. Карп; пер. с англ. – М.: Связь, 1978. – 424 с.

12. Дума Д. П. Загальна астрометрія. Навчальний посібник / Д.П. Дума – Київ: Наукова думка, 2007. – 600 с.

13. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

14. Жаров, В.А. Сферическая астрономия/ В.А Жаров // Фрязино – 2006 –С. 480.

15. Железнов И. Б. Семейства и группы малых планет/ И. Б. Железнов //Физика космоса: Тр. 38-й Международной. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2-6 февр. 2009 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. – С. 53 – 63.

16. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии / Киселев А.А. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит, 1989. – 264 с.

17. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / Кобзарь А. И. – М.: Физматлит, – 2006. – 816с.

18. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии [Текст] Кононович Э.В., Мороз В.И. – Учебное пособие / Под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. - М.: Едиториал УРСС, 2004. - 544 с.

19. Королюк В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.// М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы – 1985 — 640 с.

20. Леман Э. Проверка статистических гипотез. // М.: Наука. – 1979 – 408 с.

21. Максутов Д.Д. Астрономическая оптика / Д.Д. Максутов– М.: Наука, гл. ред. физ-мат. лит., 1984. – 272 с.

22. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и астрофотометрии звезд / А.В. Миронов – М: Физматлит, 2008. – 260 с.

23. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция / Н.Н. Михельсон – М.: Наука, Гл. ред. физ. – мат. лит., 1976. – 512 с.

24. Местецкий Л.М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры/ Л.М. Местецкий. –М.: Физматлит, 2009. –288 с.

25. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера.– М.:Физматлит,2003.–784с.

26. Мушаилов Б. Р. О проблеме кометно-астероидной опасности //Астрон. календарь на. – 1997. – С. 210-219.

27. Пакет программ ЭПОС // [Электронный ресурс] / В.Н.Львов, С.Д.Цекмейстер – Пулковская страница ОСЗ – Режим доступа к ресурсу: http://www.gao.spb.ru/personal/neo/rus/esupp/main.htm

28. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Т.2 / У. Прэтт. –М.: Мир, 1982. –480 с.

29. Саваневич В. Е. Метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением [Текст] / В. Е. Саваневич, Н. С. Соковикова, М. М. Безкровный, А. Б. Брюховецкий // Вестник НТУ ХПИ. – 2015. – Т. 39 (1148). – С. 83 – 92.

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

31. 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.

32. Сазонов В. В. Качественное увеличение деталей изображения/ В.В. Сазонов, М.А. Щербаков // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2013. – Вып. 1(2). – С. 302 – 305.

33. Соболев Н. А. Общая теория изображений/ Н. А. Соболев. –М.: Архитектура-С, 2004. –293 с.

34. Соковикова Н.С. Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении [Текст] / Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровный, С.В. Хламов // Вост.-Евр. Жур. перед. Техн.. – 2013. – Т. 4/4(64). – С. 41– 45.

35. 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.

36. Тимофеев Ю.М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.

37. Цифровое преобразование изображений / под ред. Р. Е.Быкова. – М.: Горячая линия –ТЕЛЕКОМ, 2003. –228 с.

38. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. –М.: Техносфера, 2007. –584 с.

39. Andersen G. The Telescope: Its History, Technology, and Future / G. Andersen - G Princenton University Press, 2007. – P 256.

40. Andrievsky S New 800 mm Automatic Telescope / Molotov I., Fashchevsky N., Podlesnyak S., Zhukov V. , Kouprianov V., Kashuba S. , Kashuba V. , Mel'nichenko V. , Gorbanev Yu. // *Odessa Astronomical Publications* – 2013 – V. 26 – P. 6

41. Anoraganingrum D. Cell Segmentation with Adaptive Region Growing. D. Anoraganingrum, S. Kroner, B. Gottfried // ICIAP Venedig, 1999. – pp. 27-29.

42. An accuracy estimation of the World CCD asteroid observations in the years 1999–2005 [Текст] O.P. Bykov, , V.N. L'vov, I.S. Izmailov, G.R. Kastel – Planetary and Space Science 56 – 2008 г. Режим доступа к ресурсу: http://www.puldb.ru/laza_gao/PUB/pss_1.pdf

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

44. Bannore V. (2009) Iterative-Interpolation Super-Resolution Image Reconstruction: A Computationally Efficient Technique / V. Bannore, V. – Springer Science & Business Media, 2009. – 113 p.

45. Birney D.S., Gonzalez G., Oesper D. Observational Astronomy/ D.S. Birney, Gonzalez G., Oesper D. - Cambridge University Press, 2006. – P 312.

46. Bovik A.C. (2010) Handbook of Image and Video Processing/ A.C Bovik. – Academic Press, 2010. – 1384 p.

47. Buil C. CCD Astronomy: Construction and Use of an Astronomical CCD Camera / C. Buil - Willmann-Bell, 1991. – P 390.

48. Burger W., Burge M.J. (2009) Principles of Digital Image Processing / Burger W., Burge M.J. - Berlin: Springer-Verlag, 2009 – 253p.

49. Calabretta1 M. R. and Greisen E. W., (2002). Representations of celestial coordinates in FITS. Astronomy& Astrophysics, 395, 1077–1122.

50. Calculation of residuals of asteroid positions // [Электронный ресурс]. / Fitsblink – Режим доступа к ресурсу: http://www.fitsblink.net/residuals/index.html

51. Charles J.R. Practical Astrophotography / J.R. Charles - Springer Science & Business Media, 2012. – P 301.

52. Gonzalez R.C. (2008) Digital Image Processing / R.C Gonzalez, R.E.Woods - Prentice Hall, 2008 – 954p.

53. Crespi M. Global and local reference frames / Mazzoni, A. & Colosimo, G. // *Rend. Fis. Acc. Lincei* – 2015 – V.26(Suppl 1) – P. 25-31. – Режим доступа к публ.: https://doi.org/10.1007/s12210-015-0435-0

54. Devyatkin, A. V. Apex I and Apex II Software Packages for the Reduction of Astronomical CCD Observations / A. V Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina// Solar System Research, 2010 – Vol. 44 (1) – P. 68–80.

55. Dougherty E. Mathematical Morphology in Image Processing / J. Nakamura - CRC Press, 1992. – P 552.

56. Dougherty .T. Digital Image Processing Methods / T. Dougherty - CRC Press, 2012. – P 504.

57. Dougherty E. R. Electronic Imaging Technology / E R Dougherty - SPIE Press, 1999. – P 432.

58. Ekstrom M. P. Digital Image Processing Techniques / M. P. Ekstrom - Academic Press, 2012. – P 372.

59. Elkins-Tanton L.T. Asteroids, Meteorites, and Comets / L.T.. Elkins-Tanton - Infobase Publishing, 2010. – P 289.

60. Ericson J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth/ Ericson J. – New York: Fact on File. – 2003. – 350 p.

61. Error statistics of asteroid optical astrometric observations [Текст] /Carpino, Mario; Milani, Andrea; Chesley, Steven R. – Icarus, Volume 166, Issue 2, p. 248-270. – 2003 г.

62. Folkner W. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 / Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. // IPN Progress Report 42-196 – 2014 – P. 81

63. Garrett, John, Steve, En-Hsin, Mallory, Chihway, (2010). Modelling Image Distortions from Atmospheric Turbulence in Wide-Field Astronomical Imaging Systems. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1(9), 1

64. George E. Smith. Nobel Lecture: The invention and early history of the CCD / E. Smith George // Reviews of modern physics, 2010 - 82 (3), 2307–2312.

65. Goutsias J. Mathematical Morphology / J. Goutsias, J. A. Henk, A. M. Heijmans - CRC Press, 2009. – P 439.

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. Hamilton W.T. Dwarf Planets and Asteroids: Minor Bodies of the Solar System / W.T.. Hamilton – Strategic Book Publishing Rights Agency, 2014. – P 74.

68.. Heijmans, H.J (1991) Theoretical aspects of gray-level morphology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13, 568-582

69. Heijmans H. J. and Ronse C (1990). The algebraic basis of mathematical morphology – Part I: Dilatations and erosions. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 50, 245-295

70. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy/ S. J. Howell - Cambridge University Press, 2000. – P 164.

71. HORIZONS System // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons. – Название с экрана.

72. Hipparchus: a mathematics Library / https://hipparchus.org/ – электронный ресурс.

73. International Laser Ranging Service / https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/ – электронный ресурс.

74. International Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Service / http://www.igs.org/ – электронный ресурс.

75. Janesick J. R. Scientific Charge-coupled Devices / J. R. Janesick - SPIE Press, 2001. – P 906.

76. Kallenberg O. Foundations of Modern Probability // [Текст] / Kallenberg O. – Springer – 1997 г. – ISBN 0387949577 – 535 с.

77. Klotz A., Martinez P. Practical Guide to CCD Astronomy / P. Martinez, A. Klotz - Cambridge University Press, 1998. – P 243.

78. Kitchin C.R.. Astrophysical Techniques, Sixth Edition / C.R. Kitchin - Taylor & Francis, 2013. – P 554.

79. Kunii T. L. Picture Engineering / T L Kunii- Springer Science & Business Media, 2012. – P 306.

80. L'vov, V.N., Smekhacheva, R.I., Tsekmejster, S.D., 2001. EPOS – the program package for the Solar system objects research. In: Proceedings of the Conference Near Earth Astronomy in XXI Century, pp. 235–240.

81. Vallado, David A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications [Текст] Vallado, David A. – Microcosm Press, El Segundo, CA. p. 157. – 2001 г.

82. Lu Y. Region growing method for the analysis of functional MRI data. / Y. Lu, T. Jiang, Y. Zang // NeuroImage. – No.20, 2003. – pp. 455-465.s

83Maisonobe, L. Orekit, An accurate and efficient core layer for space flight dynamics applications/ Maisonobe L., Pommier V., Parraud P.// 2008 – Режим доступа к публ.: https://orekit.org/.

84. McLean I. S. Electronic Imaging in Astronomy. Detectors and Instrumentation (Second Edition) / McLean I. S. – Berlin: Springer-Praxis, 2008. – 592 p.

85. Mighell K.J. Algorithms for CCD Stellar Photometry. Astronomical Data Analysis Software and Systems / K.J. Mighell; ed. D. V. Mehringer, R. L. Plante, D.A. Roberts // VIII ASP Conference Series. – 1999. – 172. – P. 317 – 328.

86. MPChecker: Minor Planet Checker // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.net/cgi-bin/checkmp.cgi

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

88. Nakamura J. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras / J. Nakamura - CRC Press, 2012. – P 336.

89. Parker J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision / M J. R Parker - John Wiley & Sons, 2010. – P 504.

90. Petit G. & Luzum B. IERS Conventions (2010)/ Petit G. & Luzum B.// Frankfurt am Main, 2010– P.179 – Режим доступа к публ.: https://www.iers.org/TN36/

91. Piprek J. CCD Astronomy: Optoelectronic Devices: Advanced Simulation and Analysis /J. Piprek - Springer Science & Business Media, 2005. – P 452.

92. Ratledge D. The Art and Science of CCD Astronomy/ D. Ratledge - Springer Science & Business Media, 2012. – P 162.

93. Ricklefs, R. L. Consolidated Laser Ranging Prediction Format Version 1.01/ R. L. Ricklefs// 2006 – Режим доступа к публ.: https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2006/cpf_1.01.pdf

94. Salembier P., Wilkinson, M.H.F.: Connected operators: A review of regeion-based morphologica processing techniques. IEEE SPM – Vol. 26 – 2009 - pp. 136-157.

95. Shakun, L. Accuracy of satellite optical observations and precise orbit

determination / L. Shakun, N. Koshkin, E. Korobeynikova, S. Strakhova, V. Dragomiretsky, A. Ryabov, S.Terpan //*Odessa Astronomical Publications* – 2017 – V.*30* – *P.* 242–245 – Режим доступа к публ.: https://doi.org/10.18524/1810-4215.2017.30.117660

96. Shakun L. Features of Kotlin orbit estimation library / *Odessa astronomical publication* – 2018 – v.31 – in press

97. 166. Shih F. Y. Image Processing and Mathematical Morphology: Fundamentals and Applications / F. Y. Shih – CRC Press, 2009. – P 439.

98. Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications / P. Soille - CRC Press, 2013. – P 392.

99. Statistics on residuals from observations of minor planets, by observatory code // [Электронный ресурс] MPC Submission Information – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals.txt

100. Statistics on residuals from observations of numbered minor planets, by observatory code// [Электронный ресурс] MPC Submission Information – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals2.txt

101. Theuwissen A.J. Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices / A.J. Theuwissen- Springer Science & Business Media, 1995. – P 390.

102. The Institut de Mecanique Celeste et de Calcul des Ephemerides (IMCCE) // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.imcce.fr/ – Название с экрана.

103. The OrbFit Software Package // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://adams.dm.unipi.it/~orbmaint/orbfit/

104. The Asteroid Orbital Elements Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://alumnus.caltech.edu/~nolan/astorb.html

105. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations [Текст] Chesley, Steven R.; Baer, James; Monet, David G. – Icarus, Volume 210, Issue 1, p. 158-181. – 2010 г. Режим доступа к ресурсу:

http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=usnavyresearch

106. Tremeau A., Borel N. A region Growing and merging algorithm to color segmentation, Pattern Recogmition. – Vol.30. – No.7, 1997. – pp. 1191-1203.

107. The MPC Orbit (MPCORB) Database [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html

108. Zacharias, N.; Finch, C. T. et al (2013). The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). The Astronomical Journal, 145(2), id. 44, 14.

109. Високоточна багатофункціональна система визначення траєкторій літальних апаратів авіаційних, ракетних і космічних комплексів (шифр «Вега-V»), аванпроект/технічна пропозиція – пояснювальна записка, Харківський національний університет радіоелектроніки, НДЦ ІПРЕСТ, 2017 р., 225 стор. (з додатками на 194 стор.).

110. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Яковченко А.И., Лукьянова О.А., Васильева Е.М. Высокоточная многофункциональная система определения траекторий летательных аппаратов авиационных, ракетных и космических комплексов. Збірник тез доповідей 17-ї науково-технічної конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах», м. Чернігів, 7-8 вересня 2017 р., С. 151-153.

111. Жалило А.А., Дохов А.И., Катюшина Е.В., Васильева Е.М., Яковченко А.И., Лукьянова О.А. Разработка высокоточной системы определения траекторий космических аппаратов и других высокодинамичных объектов // Прикладная радиоэлектроника. – 2017, Том 16, №3, 4.

112. Васильева Е.М., Жалило А.А. Бортовая аппаратура высокоточной системы траекторных измерений для одновременного определения параметров движения группы высокодинамичных летательных аппаратов –

6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017, 24-26 октября 2017 г., конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ – С. 212-215.

113. Гофманн-Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз, пер. з англ.. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наукова думка.– 1995. – 380 с.

114. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying [Электронный ресурс] / C. Rizos // SNAP, Australia. – 1999. – Режим доступу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/principles_gps.htm.

115. Псевдошумовые (PN) системы измерения дальности. Рекомендуемый стандарт CCSDS 414.4-B-1, выпуск 1, 36 листов, март 2009г., США.

ПУБЛІКАЦІЇ ВИКОНАВЦІВ У 2018 РОЦІ

СТАТТІ У ФАХОВИХ ВИДАННЯХ

1. Savanevych V. E., Khlamov S. V., Vavilova I. B., Briukhovetskyi A. B., Pohorelov A. V., Mkrtichian D. E., Kudak V. I., Pakuliak L. K., Dikov E. N., Melnik R. G., Vlasenko V. P., Reichart D. E.. A method of immediate detection of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames // Astron. & Astrophys. – 2018. – Vol. 609.– (A54) 11 p. DOI: 10.1051/0004-6361/201630323.

2. Khlamov S. V., Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Pohorelov A. V., Vlasenko V. P., Dikov E. N. CoLiTec software for the astronomical data sets processing // IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP). – 2018. – 4 p. DOI: 10.1109/DSMP.2018.8478504.

3. Khlamov S. V., Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Dikov E. N., Vavilova I.B. Development and improvements of computational methods implemented to CoLiTec software // Odessa Astron. Publ.–2018. – Vol. 31. – P. 211–215. DOI: 10.18524/1810-4215.2018.31.144076.

4.–6. Готуються до подання 3 статті у фахових журналах «Космічна наука і технологія», «Наука і інновації», «Astronomy & Astrophysics".

ПАТЕНТЫ

1. Свід. про реєстр. авт. права № 76339. Україна. Комп'ютерна програма «Програма фільтрації дрібно структурної складової зображень з текстовою інформацією TextSmooth» / В. П. Власенко, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, В. Є. Саваневич, А. В. Погорелов, О. І. Красов, Н. В. Білоус – дата реєстрації 26.01.2018.

2. Свід. про реєстр. авт. права № 78674. Україна. Комп'ютерна програма «Програма організації обчислювального процесу для автоматичної побудови кривих блиску CLT LC Creator» / С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, В. П. Власенко, В. Є. Саваневич – дата реєстрації 27.04.2018.

3. Свід. про реєстр. авт. права № 78675. Україна. Комп'ютерна програма «Програма інтерактивного завантаження даних астрономічних каталогів Dolli» / Є. М. Діков, О. Б. Брюховецький, В. П. Власенко, С. В. Хламов, В. Є. Саваневич – дата реєстрації 27.04.2018.

4. Свід. про реєстр. авт. права № 78676. Україна. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку інструментального блиску зірок на CCD-кадрах InstBrightStar» / В. П. Власенко, О. Б. Брюховецький, С. В. Хламов, В. Є. Саваневич – дата реєстрації 27.04.2018.

5. Свід. про реєстр. авт. права № 78677. Україна. Комп'ютерна програма «Програма відображення кривих блиску Plots Viewer» / А. В. Погорелов, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, В. Є. Саваневич, В. П. Власенко – дата реєстрації 27.04.2018.

6. Свід. про реєстр. авт. права № 78678. Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматичної побудови кривої блиску змінних зірок на CCD-кадрах LightCurveVarStar» /

В. П. Власенко, О. Б. Брюховецький, С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, Є. М. Діков – дата реєстрації 27.04.2018.

7. Свід. про реєстр. авт. права № *****. Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматичного супроводу та відображення об'єктів на CCD-кадрах AutoGuidance» / Є. М. Діков, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, Ю. М. Іващенко – дата подачі 3.12.2018.

8. Свід. про реєстр. авт. права № *****. Україна. Комп'ютерна програма «Програма узгодженої фільтрації кадрів телескопу, що отримані без добового ведення MatchedFilter» / В. П. Власенко, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький – дата подачі 3.12.2018.

9. Свід. про реєстр. авт. права № *****. Україна. Комп'ютерна програма «Програма служби обробки та зберігання CCD-кадрів та даних їх обробки CLTService» / А. В. Погорелов, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, І. Б. Вавілова – дата подачі 3.12.2018.

10. Свід. про реєстр. авт. права № *****. Україна. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку інструментального блиску зірок на CCD-кадрах з нормуванням NormInstBrightStar» / В. П. Власенко, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, І. Б. Вавілова – дата подачі 3.12.2018.

11. Свід. про реєстр. авт. права № *****. Україна. Комп'ютерна програма «Програма оцінки положення об'єкта на цифровому кадрі з профілем зображення, що не задається аналітично ObjPosEstimator» / В. П. Власенко, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов, О. Б. Брюховецький, Ю. М. Іващенко, А. В. Погорелов – дата подачі 3.12.2018.

ТЕЗИ ТА ДОПОВІДІ НА КОНФЕРЕНЦІЯХ

1. Khlamov S.V., Savanevych V.E., Briukhovetskyi O.B., Dikov E.N., Vavilova I.B., Trunova T.O. Development and improvements of computational methods imple-mented to CoLiTec software // 18–th Gamow Conference–School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology» (Ukraine, Odessa, Chernomorka, 12–18 August, 2018): сб. матер. конф. – Одесса, Украина, 2018. – С. 28.

2. Khlamov S. V., Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Pohorelov A. V., Vlasenko V. P., Dikov E. N. CoLiTec software for the astronomical data sets processing // Proceedings of the 2nd Internat. Conference on Data Stream Mining & Processing, DSMP 2018, Lviv, Ukraine, August 21st – 25th, 2018. – P. 227–230.

3. Khlamov S.V., Savanevych V.E., Briukhovetskyi O.B., Vlasenko V.P., Akhmetov V.S. Automated reduction of the photometric observations using CoLiTecVS [Электронный ресурс] // XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, IAU 30 GA, Vienna, Austria, August 20th – 31st, 2018. – Режим доступа к публ.: https://astronomy2018.univie.ac.at/PosterAbstracts/posterDivB.

4. Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Khlamov S. V., Pohorelov A. V., Vlasenko V. P., Dubovský P. A., Kudzej I., Parimucha Š. CoLiTecVS – new tool for automated reduction of photo-metric observations // 8th Internat. Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics, IWARA 2018, Cusco, Peru, USA, September 8th – 15th, 2018: сб. матер. конф. – Peru, USA, 2018. – С. 41.

5. Саваневич В. Е., Хламов С. В., Брюховецкий А. Б., Диков Е. Н., Погорелов А. В., Власенко В. П. Программное обеспечение обработки данных оптических локаторов CoLiTec и результаты его апробации в астрономии // IX международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и достижения в отрасли радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий», 3–5.10.2018. – Запорожье. – 2018. – С. 63–64.

6. Саваневич В. Е., Хламов С. В., Брюховецкий А. Б., Диков Е. Н., Власенко В. П. Программное обеспечение оптических локаторов CoLiTec и результаты его апробации в астрономии // Третья Украинская научно-техническая конференция «Специальное приборостроение: состояние и перспективы», 4–5.12.2018. – Киев. – 2018. – С. 33–34.

7. KOLOS 2018, 2018; Slovakia, Stakcin (доповідь).

8. Саваневич В. Є., Хламов С. В., Брюховецький О. Б., Діков Є. М., Власенко В. П., Погорелов А. В., Вавілова І. Б.. CoLiTecSAT – Програмне забезпечення виявлення супутників на серії кадрів / І Український космічний форум, Київ, 17-20.09.2018 (доповідь).