

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Козирєв Євген Сергійович

УДК 521.9 + 521.95 + 52-14

**ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ СПОСТЕРЕЖЕНЬ
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КАТАЛОГУ ПОЛОЖЕНЬ
НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Шульга Олександр Васильович,
НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія»,
заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Кислюк Віталій Степанович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
головний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Клецонок Валерій Володимирович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка,
завідувач відділу астрометрії і малих тіл Сонячної
системи;

Захист відбудеться «24» квітня 2013 р., о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.13 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058 м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус № 3, ауд. 506.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058 м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, корпус № 8.

Автореферат розісланий «__» березня 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
доцент, кандидат фізико-математичних наук

 Чубко Л.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Використання навколоземного космічного простору набуває все більшого значення в різноманітних областях людської діяльності. Постійно зростає кількість космічних апаратів (КА), які призначені для вирішення наукових та прикладних задач та виведені на навколоземні орбіти. На 2012 рік в навколоземному космічному просторі на висотах 100 км – 36000 км зареєстровано близько 16000 космічних об'єктів (КО) штучного походження розміром від 10 см, з яких біля 79% складають низькоорбітальні космічні об'єкти (НКО) з висотою орбіти 100 км – 2000 км. Біля 90% від загальної кількості КО складає космічне сміття (КС), тобто антропогенні об'єкти, які не мають корисного використання та знаходяться на навколоземних орбітах. У зв'язку з великою кількістю КС та його некерованістю, зростає загроза зіткнень з функціонуючими КА. Найбільш гострою проблема засмічення є для низьких та геосинхронних орбіт.

Єдиним відкритим джерелом інформації про орбіти КО є Інтернет ресурс Space-Track Стратегічного командування збройних сил США (англ. United States Strategic Command – USSTRATCOM). Ресурс містить елементи орбіти у дворядковому форматі (англ. two-line element set – TLE) для об'єктів, які супроводжуються мережею спостереження за космічним простором США. Space-Track містить елементи орбіт усіх об'єктів КС на низьких орбітах розміром від 10 см, які становлять загрозу для функціонуючих КА. Ефемериди, розраховані за даними Space-Track, можуть бути використані для прогнозування небезпечних зближень КС з функціонуючими КА, але вони не достатньо точні для визначення імовірності зіткнення. Тому існує потреба у високоточному визначенні орбіти об'єктів КС розміром від 10 см, для яких було спрогнозовано потенційно небезпечне зближення з функціонуючим КА. Незалежний контроль орбіт КА є національним інтересом багатьох країн, які здійснюють космічну діяльність. В Україні цю задачу вирішує Система контролю та аналізу космічної обстановки (СКАКО), яка функціонує у рамках Національної космічної програми України.

Масові спостереження НКО переважно здійснюється радіолокаційними станціями, які мають великі розміри та споживають до декількох десятків мегават електроенергії. На відміну від радіолокаційних засобів, видимість КО оптичним телескопом обмежується такими умовами як: темний час доби, ясне небо, знаходження об'єкта поза тіні Землі. НКО може мати видиму швидкість до 2°/с, що накладає високі вимоги до системи супроводу телескопа та ускладнює визначення координат об'єкта відносно зір. На відміну від деяких типів радіолокаторів, оптичний телескоп не може одночасно супроводжувати декілька об'єктів. Через наведені обмеження оптичні телескопи використовуються переважно для спостереження КО на високих орбітах. Більшість існуючих оптичних систем, розроблених для спостереження НКО, працюють у режимі супроводу та призначені для всебічного вивчення параметрів окремих КА: координатна інформація, зміна блиску, дальність до КА та отримання безпосереднього зображення КА.

Для незалежного контролю орбіт КА та високоточного визначення орбіти об'єктів КС розміром від 10 см може бути застосована розподілена мережа оптичних телескопів. Створення такої мережі може бути доцільним за умови

використання систем позиційних спостережень НКО без механічного супроводу. Тому актуальною є науково-технічна задача впровадження методу спостереження НКО на телескопі, який залишається нерухомим на протязі отримання ПЗЗ-кадрів із застосуванням способів формування зображення НКО, при використанні яких експозиція не обмежена видимою швидкістю руху об'єкту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи пов'язані з науково-дослідними роботами, які проводилися в Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО) державного агентства України з питань науки інновацій та інформатизації: „Вивчення впливу чинників природного і техногенного характеру на динаміку орбіти штучних супутників Землі”, фундаментальна, номер держреєстрації 0105U000392, 2005–2007 рр.; „Дослідження навколоземного космічного простору наземними оптичними та радіотехнічними засобами”, фундаментальна, номер держреєстрації 0108U000595, 2008–2010 рр.; „Визначення високоточних координат об'єктів природного походження, що максимально наблизились до Землі, із застосуванням оригінальних ПЗЗ-технологій”, фундаментальна, номер держреєстрації 0110U000259, 2010–2012 рр.; „Дослідження динаміки орбітального руху об'єктів навколоземного космічного простору за результатами спостережень наземними оптичними та радіотехнічними засобами”, фундаментальна, номер держреєстрації 111U000084, 2011–2013 рр.; а також з дослідно-конструкторською роботою за контрактом: “Спостереження космічних об'єктів та обробка їх результатів” номер держреєстрації звіту 0212U007321С, 2012р. Автор брав участь у виконанні всіх вищезгаданих робіт.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є формування каталогу положень низькоорбітальних космічних об'єктів із застосуванням комбінованого метода спостережень (КМС). КМС розроблений в НДІ МАО для визначення положень космічних об'єктів, які мають значну видиму швидкість відносно зір, на телескопі, який залишається нерухомим під час отримання ПЗЗ-кадрів. Поставлена мета розв'язувалась виконанням наступних завдань:

1. Впровадження способу накопичення кадрів із зсувом (НКЗ) (англ. Track and Stack) для формування зображень НКО та зір на нерухомому телескопі із застосуванням телевізійних ПЗЗ-камер та фотографічних об'єктивів;

2. Розробка та впровадження способу вкороченого синхронного переносу заряду (ВСПЗ) для формування зображень НКО на нерухомому телескопі із застосуванням повнокадрових ПЗЗ-камер та поворотної платформи;

3. Впровадження КМС для спостережень НКО та модифікованого методу редукції спостережень для розрахунку екваторіальних координат.

4. Проведення позиційних спостережень НКО на телескопах НДІ МАО, формування каталогу положень. Здійснення внутрішньої та зовнішньої оцінки точності спостережень НКО.

Об'єкт дослідження – низькоорбітальні космічні об'єкти.

Предмет досліджень – екваторіальні координати НКО.

Методи дослідження.

Для спостереження НКО використовувався КМС, суть якого полягає у формуванні зображень об'єкта та опорних зір на окремих кадрах із застосуванням

різних параметрів формування зображення ПЗЗ-камери. Доцільність використання способів НКЗ та ВСПЗ для формування зображень НКО на нерухомому телескопі, порівняно з класичними способами формування зображення, обґрунтовується відсутністю обмеження експозиції видимою швидкістю об'єкту. Для розрахунку екваторіальних координат НКО використовувався модифікований метод редукції, розроблений в НДІ МАО для обробки спостережень отриманих з використанням КМС. Для внутрішньої оцінки точності спостережень НКО були використані нев'язки між отриманими положеннями та ефемеридою, розрахованою із застосуванням чисельної моделі руху КО розробленої в НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету (НДІ АО ОНУ). Для зовнішньої оцінки точності спостережень НКО були використані різниці (O–C) між положеннями, отриманими зі спостережень (Observed – O), та розрахованими (Calculated – C) за ефемеридою Міжнародної служби лазерної локації (англ. International Laser Ranging Service – ILRS).

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше в Україні для формування зображення НКО із застосуванням телевізійних ПЗЗ-камер на нерухомому телескопі застосовано спосіб накопичення кадрів зі зсувом, який у порівнянні з прямим накопиченням кадрів немає обмеження експозиції видимою швидкістю об'єкту.

2. Вперше в Україні для формування зображення НКО із застосуванням повнокадрових ПЗЗ-камер та поворотної платформи на нерухомому телескопі застосовано спосіб вкороченого синхронного переносу заряду, який у порівнянні з класичним варіантом застосування режиму синхронного переносу заряду дозволяє використовувати експозицію меншу ніж час проходження об'єкта через поле зору телескопа.

3. Вперше в Україні для позиційних спостережень НКО був впроваджений комбінований метод ПЗЗ-спостережень. Для обчислення екваторіальних координат НКО був використаний модифікований метод редукції спостережень.

4. На комплексі телескопів МОБІТЕЛ НДІ МАО проведені позиційні спостереження НКО із застосуванням телевізійної та повнокадрової ПЗЗ-камер, за результатами спостережень сформований каталог положень. Здійснено внутрішню та зовнішню оцінку точності спостережень НКО. З урахуванням (O–C) положень НКО компенсована похибка реєстрації моментів часу ПЗЗ-кадрів.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані автором способи НКЗ та ВСПЗ формування зображення НКО на нерухомому телескопі застосовані автором при розробці програмного комплексу (ПК) для проведення спостережень із застосуванням КМС. Розроблений ПК був впроваджений та застосовується на усіх телескопах НДІ МАО та частково на телескопах АО ЛНУ, ЛКД УжНУ та ДМЦ “Оріон”. Впровадження ПК дозволило створити автоматичну систему спостереження на основі телевізійної ПЗЗ-камери та фотографічного об'єктиву, яка використовується для спостереження НКО (розміром від 1 м) та метеорів. Впровадження ПК дозволило створити автоматичну систему спостереження із застосуванням повнокадрової ПЗЗ-камери та поворотної платформи, яка використовується для спостереження НКО (розміром від 10 см), КО на високих орбітах та астероїдів, які зближуються із Землею (АЗЗ). Положення КО,

які були отримані у НДІ МАО із застосуванням розробленого ПК, були використані у СКАКО України, у НДІ АО ОНУ для поліпшення моделі руху НКО, у зведеному каталозі положень КО отриманому Українською мережею оптичних станцій (УМОС). Положення АЗЗ, які були отримані у НДІ МАО із застосуванням розробленого ПК, використані Центром малих планет (англ. Minor Planet Center – MPC) та сервісом що надає інформацію про астероїди, які наближуються до Землі (Near Earth Objects Dynamic Site – NEODys), а також мережею телескопів підтримки космічної місії Gaia (Gaia Follow-up Network for Solar System Objects).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи здобувач отримав самостійно. У спільно опублікованих роботах вклад здобувача такий: в [1] розробка способу ВСПЗ та його впровадження для спостереження геосинхронних КО із застосуванням КМС на телескопі ШАК; в [2–3] впровадження способу ВСПЗ для спостереження астероїдів, які зближуються із Землею (АЗЗ) із застосуванням КМС на телескопі ШАК; в [4] впровадження способу НКЗ для спостереження НКО із застосуванням КМС на телескопі ТВТ комплексу МОБІТЕЛ; в [5] оцінка похибок положень геосинхронних КО отриманих із застосуванням КМС; в [6] впровадження способу ВСПЗ для спостереження НКО із застосуванням КМС на телескопі КТ-50 комплексу МОБІТЕЛ; в [7] впровадження КМС та способу НКЗ для спостереження метеорів у оптичному діапазоні. Авторські свідоцтва [8–9] отримані автором самостійно. У всіх зазначених роботах використовувалось розроблене та впроваджене автором програмне забезпечення для проведення спостережень та обробки отриманих зображень. Також у всіх роботах автор приймав участь у проведенні спостережень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації обговорені на: Третей Української конференції по перспективним космічним дослідженням (Кацивели, 2003 г.); International conference “Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes” (Nikolaev, 2004); міжнародному науковому семінарі “Наблюдения искусственных спутников Земли и космического мусора” (Львов, 2004 г.); 9-й міжнародній конференції “Системный анализ и управление” (Євпаторія, 2004 г.); International conference “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future” (Ukraine, Kiev. 2004); International conference “Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System” (Ukraine, Nikolaev. 2006); Всеросійській Астрономічній Конференції (Росія, Нижній Архыз. 2010 г.); International Conference “Astronomical research: from near-Earth space to the Galaxy” (Ukraine, Mykolaiv. 2011); 32-й міжнародній конференції «Наука и техника: Вопросы истории и теории» (Росія, Санкт-Петербург. 2011 г.); 11-й Українській конференції з космічних досліджень (Євпаторія, 2011 р.); IAU XXVIII General Assembly (China, Beijing. 2012); Всеросійській астрономічній конференції "Пулково-2012" (Росія, Санкт-Петербург. 2012 г.); Першій всеукраїнській конференції «Лазерная локация и оптические наблюдения космических объектов» (Алчевск, 2012 г.); семінарах НДІ МАО та НАУ.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 7 статей [1–7] у фахових наукових журналах, 2 авторських свідоцтва [8–9], 8 робіт [10–17] у

збірниках наукових праць та 15 тез доповідей [18–32] на науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків і 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 168 сторінок, в тому числі 48 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел містить 115 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність теми дисертації, визначено об'єкт і предмет досліджень, цілі і завдання, зв'язок роботи з науковими програмами і темами НДР НДІ МАО; сформульовано мету роботи і визначено наукову новизну та практичну значущість роботи, визначено особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, дано інформацію про публікацію та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

У першому розділі розглянуто діяльність України у напрямку контролю навколоземного космічного простору, каталог елементів орбіт у форматі TLE з відкритого Internet ресурсу Space-Track, проблему уточнення небезпечних наближень об'єктів КМС до функціонуючих КА, радіолокаційні та оптичні засоби, які використовуються для спостереження НКО.

Для контролю навколоземного космічного простору необхідне регулярне оновлення каталогу орбіт КО, що потребує застосування різноманітних засобів спостереження. Для підтримки каталогу орбіт НКО використовуються РЛС з фазованою антенною решіткою, які здатні за декілька секунд сканувати площу неба у тисячі квадратних градусів та одночасно супроводжувати десятки об'єктів. Для уточнення вірогідності зіткнення функціонуючого КА з фрагментами КМС використовуються РЛС з параболічною антеною, які здатні супроводжувати та вимірюють окремі об'єкти з великою точністю.

Для спостереження НКО також використовуються спеціалізовані оптичні телескопи, які окрім отримання координатної інформації здійснюють лазерну локацію, отримують фотометричні спостереження та зображення великих НКО. Ці телескопи відрізняються спеціалізованими опорно-поворотними механізмами, які здатні прецизійно супроводжувати об'єкти на швидкостях до $4^\circ/\text{с}$. Ці складні оптичні системи призначені для всебічного вивчення окремих КА та не є ефективними для масових спостережень НКО або високоточних спостережень малорозмірних фрагментів КМС. Найбільш поширеними такі телескопи є в Росії та Україні. В Україні до такого типу телескопів належать дві квантово-оптичні системи "Сажень-С" розташовані біля міст Євпаторія та Дунаївці та телескоп КТ-50 Одеської астрономічної обсерваторії. У Кримській астрофізичній обсерваторії проводились експерименти із застосуванням оптичних систем для координатних спостережень НКО.

Наразі ще не існує функціонуючих мереж оптичних телескопів призначених для масового спостереження НКО, які використовуються для оновлення каталогу орбіт або уточнення відстані небезпечних зближень.

У другому розділі дано порівняння методів спостережень НКО на нерухомому телескопі та у режимі супроводу. Запропоновано способи формування зображення НКО на нерухомому телескопі: накопичення кадрів зі зсувом для телевізійних ПЗЗ-камер та вкорочений синхронний перенос заряду для повнокадрових ПЗЗ-камер. Наводиться опис особливостей застосування комбінованого методу для спостереження НКО.

Спостереження НКО за попередньо розрахованою ефемеридою можуть здійснюватися в режимі механічного супроводу цілі або на нерухомому телескопі (телескоп заздалегідь наводиться у декілька точок за ефемеридою). В режимі супроводу, для досягнення максимальної координатної точності, рух телескопа має бути рівномірним під час експозиції. Якщо об'єкт що спостерігається рухається в полі зору телескопа, то перевищення певного ефективного часу експозиції вже не приводить до підвищення відношення сигнал/шум і знижує точність визначення координат. У випадку нерухомого телескопа ефективна експозиція залежить від видимої швидкості об'єкта, а у випадку рівномірного супроводу від прискорення об'єкта, що можна виразити наступними формулами:

$$E_{Stare} = (W + M)/v, \quad (1)$$

$$E_{Track} = \sqrt{2(W + M)/a}, \quad (2)$$

$$M = \arctg(C/F) \times N_{Bin}, \quad (3)$$

де E_{Stare} – ефективна експозиція для нерухомого телескопа; E_{Track} – ефективна експозиція для режиму супроводу; v – видима кутова швидкість об'єкта; a – видиме кутове прискорення об'єкта; W – кутовий розмір зображення зір; M – кутовий розмір пікселя зображення; C – фізичний розмір пікселя ПЗЗ-матриці; F – фокусна відстань; N_{Bin} – бінування (об'єднання електронних зарядів декількох пікселів перед оцифруванням).

Видима кутова швидкість НКО значно вища за прискорення, тому ефективна експозиція в режимі супроводу значно вища ніж на нерухомому телескопі. Системи спостереження з супроводом мають значну перевагу у проникній здатності, але у них існує проблема накопичення похибки нерівномірності механічного руху. За відсутності прецизійних приводів, здатних працювати у діапазоні швидкостей $0,05^\circ/\text{с} - 2,0^\circ/\text{с}$, для досягнення високої кутовий точності, необхідно вводити обмеження експозиції. До переваг спостереження на нерухомому телескопі можна віднести здатність здійснювати спостереження НКО з великою похибкою ефемериди вздовж орбіти за рахунок збільшення часу спостереження у нерухомому стані.

В роботі запропоновані нові способи формування зображення НКО на нерухомому телескопі, які дозволяють отримувати зображення об'єкту аналогічні тим, які одержують в режимі механічного супроводу. Використання цих способів поєднує переваги спостереження на нерухомому телескопі та з механічним супроводом: час експозиції обмежений прискоренням, а не швидкістю НКО; відсутній вплив механіки на точність отриманих положень; спрощений процес спостереження НКО з великою похибкою ефемериди вздовж орбіти. Для

телевізійних ПЗЗ-камер запропонований спосіб накопичення кадрів зі зміщенням, для повнокадрових ПЗЗ-камер – спосіб вкороченого синхронного переносу заряду.

При спостереженні нерухомих об'єктів на телевізійній ПЗЗ-камері ефективним способом підвищення співвідношення “сигнал/шум” є накопичення декількох десятків/сотень кадрів. При неточному часовому веденні телескопа за час експозиції в кілька хвилин зображення зір можуть істотно зміститися. У цьому випадку для отримання кадру з тривалою експозицією застосовується технологія складання серії кадрів з короткою експозицією з вирівнюванням зображень окремих кадрів за декількома яскравими зірками. Цей підхід застосовується як для кадрів, отриманих на повнокадрових ПЗЗ-камерах, так і для накопичених телевізійних кадрів. При спостереженні об'єкта, який має значну швидкість відносно зір (наприклад АЗЗ), застосовується додаткове зміщення кадрів на відстань, яку проходить об'єкт в полі зору телескопа – спосіб накопичення кадрів зі зсувом (рис. 1). На кадрі накопиченому із застосуванням НКЗ об'єкт спостереження має крапкове зображення, в той час як зображення зір являють собою послідовності крапкових зображень. Цей спосіб можна назвати цифровим супроводом об'єкта. Спосіб НКЗ ефективний при спостереженні із застосуванням телевізійних ПЗЗ-камер на нерухомому телескопі. Попереднє вирівнювання зображень окремих кадрів за зірками непотрібно, так як під час отримання кадрів телескоп нерухомий. Цей спосіб особливо ефективний для спостереження НКО із застосуванням фотографічних об'єктивів.

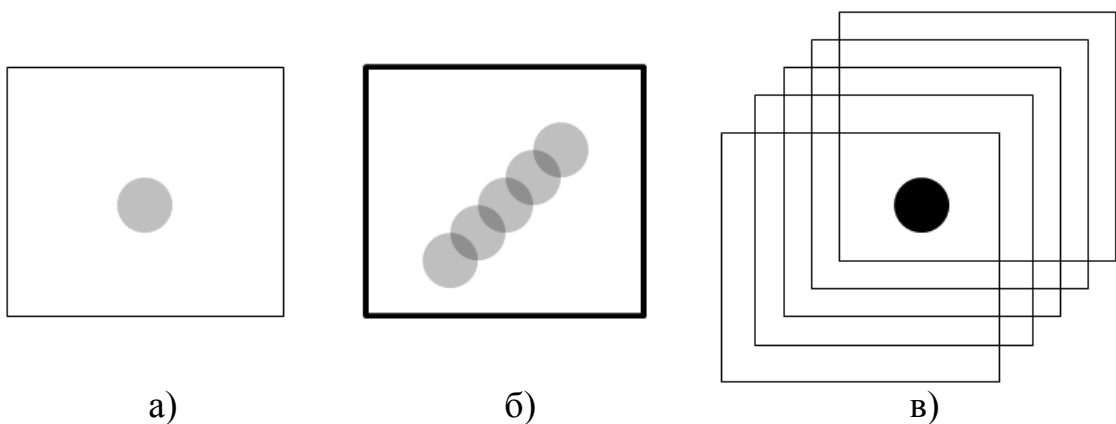


Рисунок 1 – Схематичні зображення накопичення кадрів рухомого об'єкту: а) – один кадр; б) – пряме накопичення; в) – спосіб накопичення зі зсувом

Момент часу накопиченого кадру t визначається як середній момент часу кадрів, які накопичуються. Зміщення i -го кадру серії Δx_i , Δy_i розраховуються як відстань, яку проходить об'єкт за час між моментом даного кадру t_i та моментом накопиченого кадру t за формулами:

$$\Delta x_i = -(t_i - t)v \sin A_{ObjCCD}/M, \quad \Delta y_i = -(t_i - t)v \cos A_{ObjCCD}/M, \quad (4)$$

де v – кутова швидкість об'єкта (див. формулу (5)); A_{ObjCCD} – кут руху об'єкта в системі координат ПЗЗ-матриці (див. формулу (10)); M – кутовий розмір (масштаб) пікселя (див. формулу (3)).

Інтенсивності пікселів зсунутого зображення $I'_{x',y'}$ розраховуються за інтенсивностями пікселів вихідного зображення $I_{x,y}$ зсунутих на Δx , Δy з урахуванням також і дробової частини за формулою:

$$I'_{x',y'} = I_{x,y}c_{00} + I_{x+1,y}c_{10} + I_{x,y+1}c_{01} + I_{x+1,y+1}c_{11},$$

де $x = x' + [\Delta x]$; $y = y' + [\Delta y]$; $c_{00} = (1 - \{\Delta x\})(1 - \{\Delta y\})$; $c_{10} = \{\Delta x\}(1 - \{\Delta y\})$; $c_{01} = (1 - \{\Delta x\})\{\Delta y\}$; $c_{11} = \{\Delta x\}\{\Delta y\}$; $[]$ – округлення до найближчого цілого у меншу сторону; $\{ \}$ – дробова частина числа.

У повнокадрових ПЗЗ-матриць є особливий режим формування зображення – синхронний перенос заряду (СПЗ) або часова затримка накопичення (англ. time delay and integration – TDI). Синхронне паралельне зміщення зарядових пакетів вздовж стовпців ПЗЗ-матриці під час експозиції дозволяє отримувати невитягнуте зображення об'єкта, який рівномірно рухається вздовж стовпців матриці. Експозиція зображення дорівнює часу проходження об'єкта через матрицю. Режим СПЗ широко застосовується в астрометрії для сканування великих ділянок зоряного неба на нерухомих телескопах. На телескопах з азимутальним монтуванням для орієнтації стовпців матриці вздовж напрямку руху зір використовується спеціальний пристрій – поворотна платформа (англ. rotator), який обертає ПЗС-камеру навколо оптичної вісі об'єктива.

В класичному варіанті при застосуванні режиму СПЗ час експозиції дорівнює часу проходження об'єкту через поле зору телескопа. Час проходження НКО через поле зору телескопа розміром $>0,5^\circ$ у більшості випадків перевищує ефективну експозицію для режиму супроводу, яка визначається за формулою (2).

Автором був запропонований спосіб вкороченого синхронного переносу заряду при використанні якого протягом заданого часу експозиції здійснюється синхронний перенос заряду вздовж стовпців матриці, а потім здійснюється швидке зчитування зображення з матриці (як звичайного кадру). Цей спосіб дозволяє задавати час експозиції у діапазоні від 0 до часу проходження об'єкта через поле зору. Для орієнтації стовпців ПЗЗ-матриці вздовж напрямку руху НКО необхідно застосування поворотної платформи. Застосування режиму ВСПЗ та поворотної платформи проілюстровано на рис. 2.

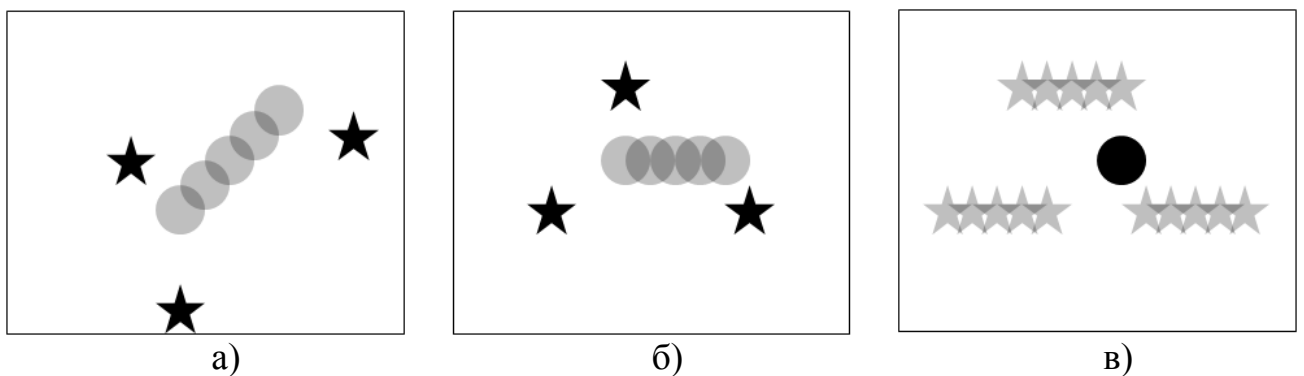


Рисунок 2 – Схематичні зображення НКО та зір отриманих із застосуванням повнокадрової ПЗЗ-камери: а) – кадровий режим; б) – кадровий режим з поворотом камери; в) – спосіб ВСПЗ з поворотом камери

Кут повороту ПЗЗ-камери в інструментальній системі координат A_{CCDTel} визначається як кут руху об'єкта в інструментальній системі координат A_{ObjTel} , який розраховується за формулою (8). Період переносу заряду T та кількості рядків, які зчитуються в режимі СПЗ N_{Rows} визначаються як:

$$T = \frac{M}{v}, \quad N_{Rows} = \left\lfloor \frac{E}{T} + 0,5 \right\rfloor,$$

де M – кутовий розмір пікселя (див. формулу (3)); v – кутова швидкість об'єкта (див. формулу (5)); E – заданий час експозиції; $\lfloor \]$ – округлення до найближчого цілого у меншу сторону.

Розрахунок моменту часу t кадру отриманого способом ВСПЗ, здійснюється з урахуванням моментів зчитування рядків в режимі СПЗ t_i та затримки зчитування рядка T_{Delay} :

$$t = a_0 + a_1 \left(\left\lfloor \frac{N_{Rows}}{2} \right\rfloor + 0,5 \right) - T_{Delay},$$

$$\sum_{i=1}^{N_{Rows}} (t_i - a_0 - i \times a_1)^2 \rightarrow \min,$$

де a_0, a_1 – коефіцієнти лінійної залежності моментів t_i від номера рядка i .

Значення затримки T_{Delay} визначено експериментально, при синхронізації переносу заряду секундним імпульсом, прив'язаним до абсолютної шкали часу.

За ефемеридою об'єкта, яка є послідовністю моментів часу і екваторіальних координат t_i, τ_i, δ_i , визначається кутова швидкість об'єкта v та кут руху в екваторіальній системі координат A_{ObjStr} :

$$v = \sqrt{(\delta_i - \delta_{i-1})^2 + ((\delta_i - \delta_{i-1}) \cos \delta_i)^2} / (t_i - t_{i-1}), \quad (5)$$

$$A_{ObjStr} = \arctg \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{(\tau_i - \tau_{i-1}) \cos \delta_i}. \quad (6)$$

Для застосування способів НКЗ та ВСПЗ потрібно перетворити параметри руху НКО з екваторіальної системи координат в інструментальну систему телескопа. Позначимо кути інструментальної системи як: θ – зенітний, φ – азимутальний, A_{CCDTel} – кут повороту ПЗЗ-матриці. Значення цих кутів визначаються за датчиками кута повороту осей. Перетворення між екваторіальною та інструментальною системами виражається наступним співвідношенням:

$$\begin{cases} \cos \varphi \cos \theta = \cos \delta \cos \delta_0 (\cos \tau \cos \tau_0 + \sin \tau \sin \tau_0) - \sin \delta \sin \delta_0 \\ \sin \varphi \cos \theta = \cos \delta (\sin \tau \cos \tau_0 - \cos \tau \sin \tau_0) \\ \sin \theta = \cos \delta \sin \tau_0 (\cos \tau \cos \tau_0 + \sin \tau \sin \tau_0) + \sin \delta \cos \delta_0 \end{cases}, \quad (7)$$

де τ_0, δ_0 – координати напрямку азимутальної осі телескопа в екваторіальній системі.

Зі співвідношення (7) були виведені функції перетворення з екваторіальної в інструментальну систему координат $\varphi = F_\varphi(\tau, \delta)$, $\theta = F_\theta(\tau, \delta)$. Через функції перетворення здійснюється розрахунок кутів руху зір A_{StrTel} в інструментальній системі:

$$A_{StrTel} = \arctg \frac{F_\theta(\tau, \delta) - F_\theta(\tau - \Delta, \delta)}{(F_\varphi(\tau, \delta) - F_\varphi(\tau - \Delta, \delta)) \cos(F_\theta(\tau, \delta))}$$

де Δ – нескінченно малий кут.

Із застосуванням кута руху зір A_{StrTel} в інструментальній системі, кут руху об'єкта переводиться із екваторіальної системи A_{ObjStr} (див. формулу (6)) в інструментальну A_{ObjTel} :

$$A_{ObjTel} = A_{ObjStr} + A_{StrTel}, \quad (8)$$

Із застосуванням кута повороту ПЗЗ-матриці A_{CCDTel} кути руху зір та об'єкта із інструментальної системи координат (A_{StrTel}, A_{ObjTel}) перетворюються у систему ПЗЗ-матриці (A_{StrCCD}, A_{ObjCCD}):

$$A_{StrCCD} = A_{StrTel} - A_{CCDTel}, \quad (9)$$

$$A_{ObjCCD} = A_{ObjTel} - A_{CCDTel}. \quad (10)$$

Для визначення координат азимутальної вісі телескопа в екваторіальній системі координат τ_0, δ_0 формуються кадри з зображенням зір в трьох положеннях телескопа з незмінним зенітним кутом і кроком за азимутом 120° . Після ототожнення зір з каталогом визначаються координати центра поля зору в екваторіальній системі координат $\tau_1, \delta_1, \tau_2, \delta_2, \tau_3, \delta_3$. Напрямок азимутальної вісі телескопа розраховується як точка рівновіддалена від центрів поля зору у трьох кадрах.

Поправки інструментальної системи координат $\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta A_{CCDTel}$ визначалися за кадром отриманим в небесному екваторі і меридіані ($\tau = 0, \delta = 0$) як:

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= F_{\theta}(\tau, \delta) - \theta, \\ \Delta\varphi &= F_{\varphi}(\tau, \delta) - \varphi, \\ \Delta A_{CCDTel} &= (A_{StrTel} - A_{StrCCD}) - A_{CCDTel},\end{aligned}$$

де θ , φ , A_{CCDTel} – кути повороту інструментальної системи, отримані за датчиками кута повороту осей; τ , δ – екваторіальні координати центра поля зору, отримані після ототожнення зір з каталогом; A_{StrTel} – кут руху зір в інструментальній системі визначений через τ , δ ; A_{StrCCD} – кут руху зір в системі ПЗЗ-матриці визначений за коефіцієнтами формул редукції.

Для спостереження НКО використовується комбінований метод ПЗЗ-спостережень. КМС було запропоновано в НДІ МАО для позиційних спостережень астрономічних об'єктів, які мають значну видиму швидкість відносно зір (КО, АЗЗ) на нерухомому, під час отримання ПЗЗ-кадрів, телескопі. Застосування КМС полягає в отриманні серії ПЗЗ-кадрів з зображенням НКО та двох кадрів з зображеннями опорних зір на нерухомому телескопі. При спостереженні із застосуванням телевізійної ПЗЗ-камери формування серії кадрів із зображенням НКО та кадрів із зображеннями опорних зір здійснюється паралельно із застосуванням способу НКЗ. Для отримання зображень зір зсув телевізійних кадрів розраховується (див. формулу (4)) із застосуванням куту напрямку руху зір у системі ПЗЗ-матриці A_{StrCCD} (див. формулу (9)) та кутової швидкості зір $v = 15,041 \cos \delta$ ("/с). При спостереженні із застосуванням повнокадрової ПЗЗ-камери формування кадрів із зображеннями опорних зір здійснюється до, та після серії кадрів з зображенням об'єкта. Для отримання зображення зір використовується коротка експозиція, яка визначається за формулою (1) де швидкість об'єкта дорівнює швидкості зір.

Для розрахунку екваторіальних координат НКО використовувався модифікований метод розроблений в НДІ МАО для редукції спостережень отриманих комбінованим методом. Суть модифікованого методу редукції: за кадрами з зображеннями зір з використанням кубічної моделі редукції визначаються редукційні коефіцієнти (сталі пластинки); значення редукційних коефіцієнтів лінійно інтерполюються за часом на момент спостереження об'єкту, і використовуються для перетворення координат об'єкта з системи ПЗЗ-матриці в систему опорного каталогу. Середня кількість опорних зір на кадрі для телескопа ТВТ складає 90, для телескопа КТ-50 – 180, що достатньо для використання кубічної моделі редукції.

У третьому розділі розглянуто умови спостереження НКО, проведено аналіз ефективності застосування об'єктів з різною фокусною відстанню для запропонованих способів формування зображення, наведені технічні характеристики телескопів НДІ МАО та склад програмного комплексу, який використовувався для спостереження та обробки, описаний процес обробки ПЗЗ-кадрів.

Для вибору оптимального об'єктива та параметрів спостереження НКО із застосуванням КМС автором був проведений аналіз умов спостереження таких, як середня видима швидкість та прискорення, а також похибка ефемериди вздовж і поперек орбіти. Для розрахунку ефемерид використовувався каталог орбіт у форматі

TLE від USSTRATCOM та відповідна модель руху SGP4. Аналіз ефемерид усіх НКО на 2 доби показав, що середня видима швидкість знаходиться у межах $0,1^\circ/\text{с} - 0,5^\circ/\text{с}$, а середнє прискорення досягає $10''/\text{с}^2$. Дослідження залежності похибки ефемериди від інтервалу прогнозу полягало у порівнянні ефемерид, розрахованих за елементами орбіти з різними епохами. Розрахунок був проведений для Українських КА: Сич 1, Океан О, ЄгиптСат та Січ 2, які мають висоту орбіти 600 км – 700 км. Дослідження показало, що похибка ефемериди знаходиться у межах $\pm 0,1^\circ$ на інтервалі прогнозу 5 діб; у межах $\pm 1^\circ$ на інтервалі 25 діб; у межах $\pm 10^\circ$ на інтервалі 50 діб. Похибка у напрямку поперек орбіти знаходиться у межах $\pm 0,1^\circ$ на інтервалі 25 діб; у межах $\pm 1^\circ$ на інтервалі 50 діб. Похибка ефемериди вздовж орбіти виражена у часі знаходиться у межах $\pm 5\text{с}$ на інтервалі 25 діб; у межах $\pm 30\text{с}$ на інтервалі 50 діб.

З урахуванням визначених умов спостереження НКО був проведений аналіз доцільності використання об'єктивів з різною фокусною відстанню для спостережень на телевізійних (спосіб НКЗ) та повнокадрових (спосіб ВСПЗ) ПЗЗ-камерах. Аналіз показав, що застосування телевізійних ПЗЗ-матриць з діагоналлю 1/2 дюйма не є ефективним для високоточного визначення орбіт фрагментів КС; для контролю орбіт КА найбільш ефективною є фокусна відстань 85 мм – 135 мм. При застосуванні повнокадрових ПЗЗ-матриць з розміром 1,5 дюйма для контролю орбіт КА найбільш ефективною є фокусна відстань 500 мм – 750 мм, для високоточного визначення орбіт фрагментів КС найбільш ефективною є фокусна відстань 1500 мм – 3000 мм.

Для спостереження НКО способом НКЗ використовувався, виготовлений в НДІ МАО, телескоп ТВТ, оснащений телевізійною ПЗЗ-камерою WAT-902H (діагональ матриці 1/2 дюйма) та фотографічним об'єктивом “Таир 11А” ($F = 135\text{ мм}$, $D/F = 1/2,8$). Поле зору телескопа складає $2,70^\circ \times 2,05^\circ$; максимальна похибка наведення $0,1^\circ$; допустима похибка ефемериди поперек орбіти становить 1° , вздовж орбіти залежить від тривалості спостереження у фіксованому положенні телескопа. Для спостереження НКО способом ВСПЗ використовувався, модернізований в НДІ МАО, телескоп КТ-50 оснащений повнокадровою ПЗЗ-камерою Arogee U9000 (розмір матриці 1,5 дюйма) та поворотною платформою. Об'єктив КТ-50 має параметри $F = 3000\text{ мм}$, $D = 500\text{ мм}$; поле зору становить $0,7^\circ \times 0,7^\circ$; максимальна похибка наведення $0,05^\circ$, допустима похибка ефемериди $0,15^\circ$.

Для здійснення спостережень, обробки та аналізу отриманих даних був розроблений програмний комплекс, який включає наступні програми: PlanCU – розрахунок ефемерид за елементами орбіт в TLE форматі із застосуванням аналітичної моделі руху SGP4 (розроблена в НЦУВКЗ, автор приймав участь у розробці вимог та тестуванні); Control – автоматичне керування процесом спостереження (розроблена автором); Motion – управління приводами телескопа (розроблена автором); CCD - робота з повнокадровими ПЗЗ-камерами, обробка ПЗЗ зображень (розроблена автором); Video – робота з телевізійними ПЗЗ-камерами (розроблена автором); Astrometrica – обробка кадрів з опорними зірками (розроблена Herbert Raab); Satellite – розрахунок екваторіальних координат НКО, які спостерегалися із застосуванням КМС (розроблена в НДІ МАО, автор приймав участь у розробці вимог та тестуванні); CalculationMotionCelestialObjects –

розрахунок орбіти КО з визначенням нев'язок (розроблена в НДІ АО ОНУ, автор приймав участь у розробці вимог та тестуванні); ControlObservTool – порівняння положень КО з ефемеридою IIRS (розроблена в НДІ АО ОНУ, автор приймав участь у розробці вимог та тестуванні); FAVOR – ведення каталогу положень, обробка результатів, розрахунку орбіт та порівняння з ефемеридою IIRS (розроблена автором).

Четвертий розділ присвячений формуванню каталогу положень НКО за спостереженнями виконаними на телескопах ТВТ та КТ-50. Визначено точносні та кількісні характеристики опорної системи зір, визначено випадкові та систематичні похибки положень НКО, оцінена похибка реєстрації моментів часу.

У 2011–2012 рр. за участю автора на телескопі ТВТ було проведено 22 ночі спостережень НКО, на телескопі КТ-50 – 37 ночей. Всі отримані ПЗЗ-кадри були оброблені до отримання екваторіальних координат об'єктів, які були оформлені у вигляді каталогу положень. Каталог положень включає: 40441 положень 195 об'єктів, отриманих за спостереженнями на телескопі ТВТ; 1339 положень 46 об'єктів, отриманих за спостереженнями на телескопі КТ-50. Для оцінки можливості спостереження малорозмірних НКО на телескопі ТВТ проведені спостереження мінісупутників дистанційного зондування Землі RAPIDEYE з розміром $1,2 \times 0,8 \times 0,9$ м і масою 150 кг. На телескопі КТ-50 проведені спостереження наносупутників CubeSat, які мають кубічну форму з розміром 10 см – 20 см і масу 1 кг – 10 кг. Для оцінки систематичних похибок проводились спостереження об'єктів, які супроводжуються службою IIRS.

При використанні КМС точність визначення екваторіальних координат об'єкта перш за все залежить від якості опорної системи – кількості зір та їх нев'язок з каталогом. Оцінка якості опорної системи для телескопів ТВТ та КТ-50 здійснена за більш ніж 600 кадрами із зірками. Середня кількість опорних зір на кадрі для телескопа ТВТ склала 90, для телескопа КТ-50 склала 180. Якість опорної системи для телескопів ТВТ та КТ-50 проілюстровано на рис. 3–4.

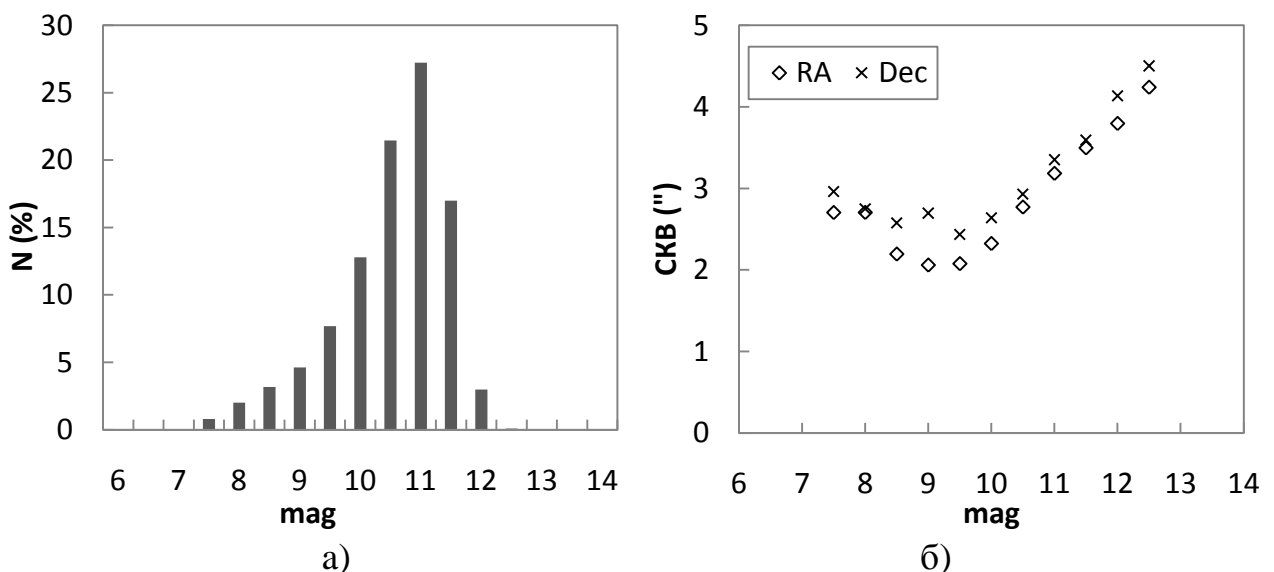


Рисунок 3 – Залежність від зоряної величини: а) – відносної кількості (N); б) – СКВ положень зір для телескопа ТВТ

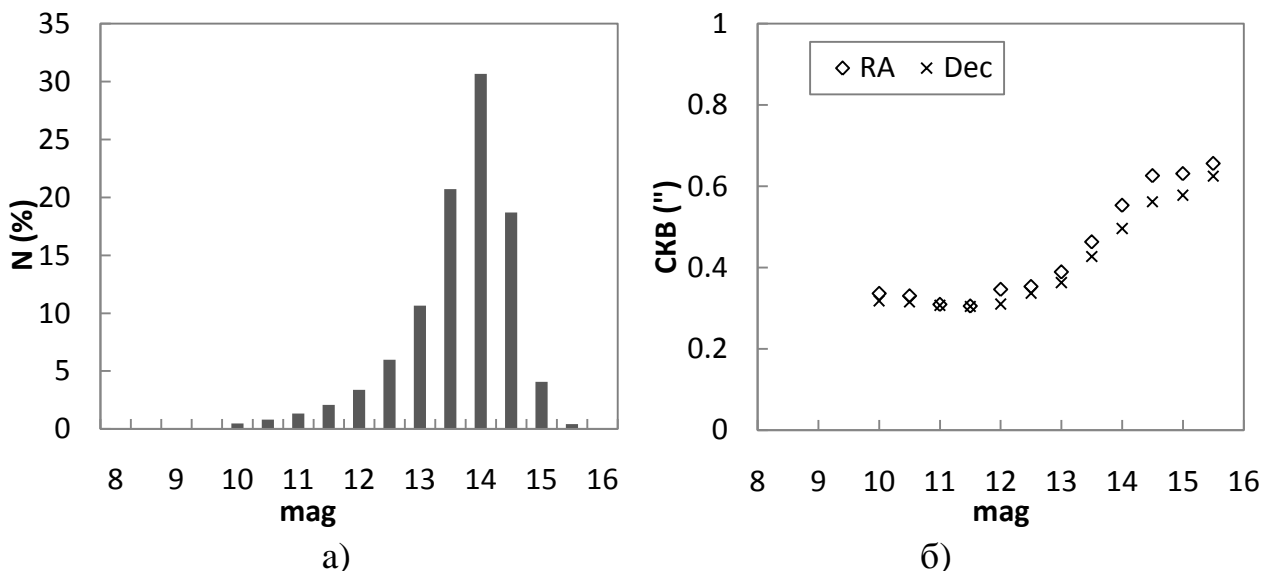


Рисунок 4 – Залежність від зоряної величини: а) – відносної кількості (N); б) – СКВ положень зір для телескопа КТ-50

З рис. 3 видно, що при спостереженні НКО на телескопі ТВТ опорними є зірки до 11^m , СКВ опорної системи дорівнює $\pm 3''$. З рис. 4 видно, що при спостереженні НКО на телескопі КТ-50 опорними є зірки до 14^m , СКВ опорної системи дорівнює $\pm 0,5''$.

При спостереженні НКО у великому діапазоні змінюються: видима швидкість, прискорення, часовий кут, схилення, висота над горизонтом (шар атмосфери), нахилена дальність, блиск, кут напрямку руху відносно небесного екватору, положення зображення об'єкту на ПЗЗ-кадрі. Зміна видимої швидкості приводить до зміни експозиції. Вище зазначені умови можуть впливати на випадкову та систематичну похибки визначених положень НКО. Процес формування зображення залежить від напрямку руху та швидкості об'єкту, тому доцільно, окрім похибок у екваторіальній системі координат, розглядати похибки уздовж та поперек напрямку руху.

Для визначення похибки положень НКО за спостереженнями на одному витку здійснювався розрахунок ефемериди із застосуванням чисельної моделі руху КО, розробленої в НДІ АО ОНУ. Похибка положень була визначена як середньоквадратичне відхилення положень від розрахованої за ними ефемериди. Для телескопа ТВТ похибка положень була визначена за 30317 положеннями НКО, та склала за прямим піднесенням (RA) та схиленням (Dec) $\pm 2,5''$. Для телескопа КТ-50 похибка положень була визначена за 786 положеннями НКО, та склала за RA і Dec $\pm 0,6''$. Автором проведений аналіз залежності похибки положень НКО від зоряної величини (рис. 5 – б), схилення, висоти над горизонтом, видимої швидкості та нахиленої дальності.

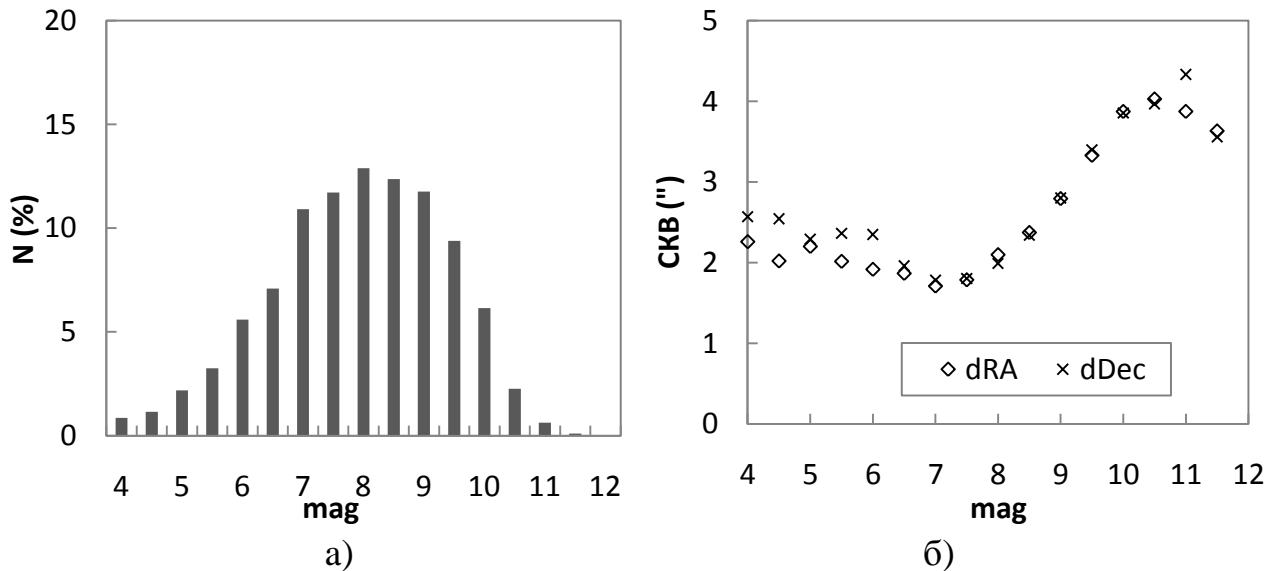


Рисунок 5 – Залежність від зоряної величини: а) – відносної кількості (N); б) – похибки положень НКО, отриманих на телескопі ТВТ

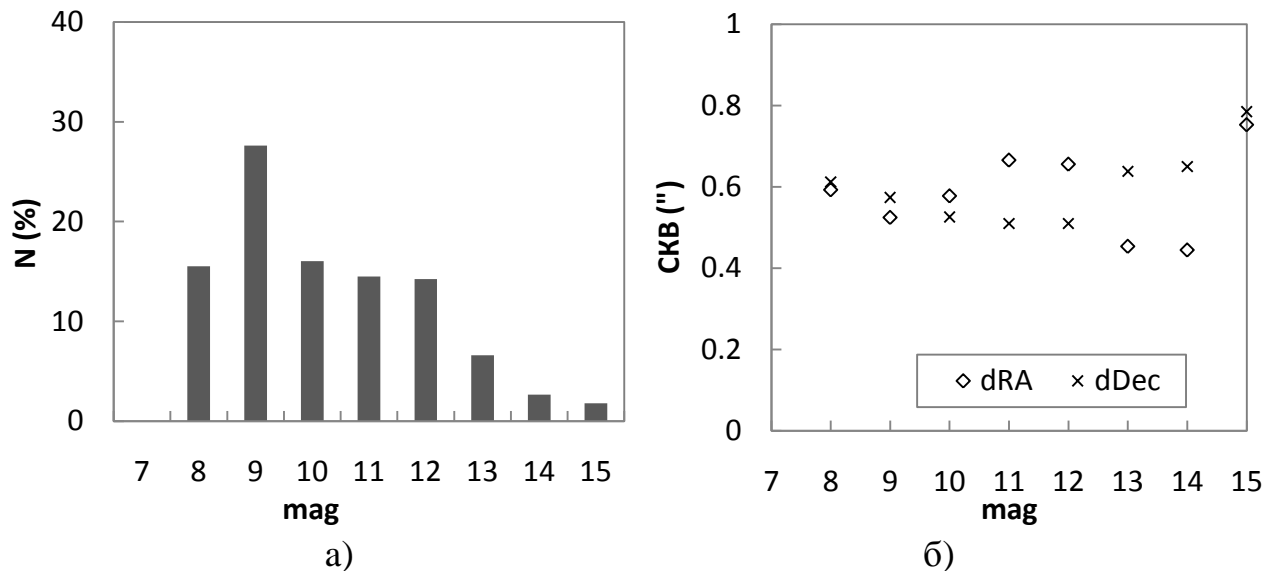


Рисунок 6 – Залежність від зоряної величини: а) – відносної кількості (N); б) – похибки положень НКО, отриманих на телескопі КТ-50

Служба ILRS надає високоточні ефемериди для КА, оснащених кутовими відбивачами, за спостереженнями міжнародної мережі лазерних далекомірів. З порівняння отриманих положень НКО з ефемеридами були визначені (О–С) положень за прямим піднесенням, схиленням, вздовж орбіти, поперек орбіти. Для телескопа ТВТ (О–С) були визначені із застосуванням 4973 положень НКО, для телескопа КТ-50 – із застосуванням 241 положень НКО.

Середнє (О–С) положень НКО залежить від умов спостереження, які змінюються у великому діапазоні. Під час спостереження НКО на одному витку орбіти умови спостереження змінюються плавно, тому середнє (О–С) положень НКО може бути апроксимоване поліномом (див. рис. 7 – 8).

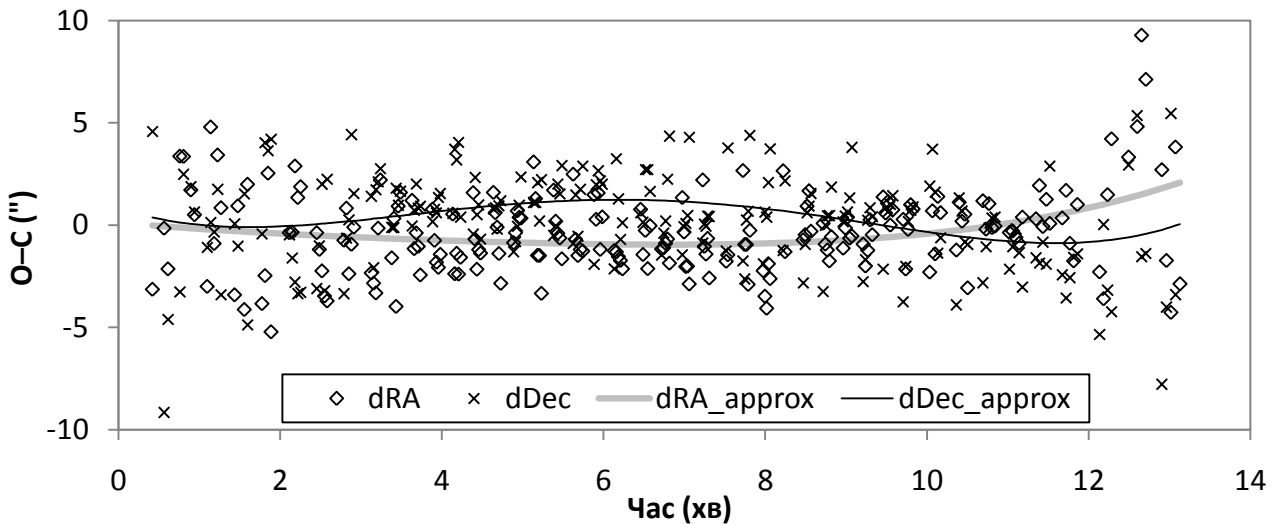


Рисунок 7 – (O–C) положень супутника Jason (висота 1320 км), отриманих на телескопі ТВТ з апроксимуючою кривою

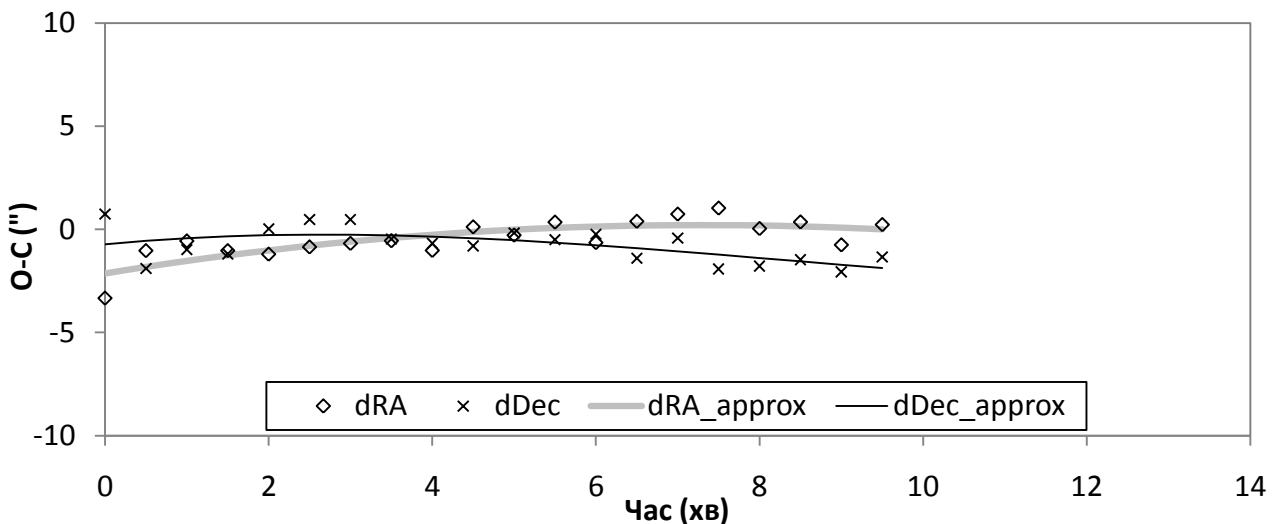


Рисунок 8 – (O–C) положень супутника Jason 2 (висота 1340 км), отриманих на телескопі КТ-50 з апроксимуючою кривою

В наведеному на рис. 7 прикладі за результатами спостережень НКО на телескопі ТВТ, за 207 положеннями середнє (O–C) за RA склало $-0,36''$, за Dec склало $+0,11''$; СКВ апроксимуючої кривої (O–C) за RA склало $\pm 0,79''$ за Dec склало $\pm 0,75''$. В наведеному на рис. 8 прикладі за результатами спостережень НКО на телескопі КТ-50, за 20 положеннями середнє (O–C) за RA склало $-0,43''$, за Dec склало $-0,78''$; СКВ апроксимуючої кривої (O–C) за RA склало $\pm 0,85''$, за Dec склало $\pm 0,93''$.

СКВ апроксимуючих кривих (O–C) для усіх спостережень телескопа ТВТ за RA і Dec склало $\pm 1,5''$; для телескопа КТ-50 за RA склало $\pm 1,0''$ та за Dec склало $\pm 1,3''$.

Для телескопа ТВТ СКВ апроксимуючих кривих (O–C) у 1,6 разів менше за похибку положень та співпадає за RA і Dec, що свідчить про високу достовірність методик і алгоритмів, які були використані для спостережень та обчислень. Для телескопа КТ-50 СКВ апроксимуючих кривих (O–C) приблизно у 2 рази більше за

похибку положень та відрізняється на 30% за RA і Dec, що вказує на необхідність подальшого удосконалення методик і алгоритмів, які були використані для спостережень та обчислень.

Порівняння визначених положень НКО з ефемеридою IIRS було використане для оцінки постійної похибки реєстрації моментів часу ПЗЗ-кадрів, внесеної затримками в електронному обладнанні. Поправка часу визначалася як середнє значення (O-C) вздовж орбіти, які були переведені у час із застосуванням кутової швидкості об'єкту. Після внесення поправки в моменти часу усіх положень було здійснено повторне порівняння положень НКО з ефемеридою IIRS. СКВ апроксимуючої кривої (O-C) по RA і Dec зменшились, що свідчить про коректність внесеної поправки. Для телескопа ТВТ поправка часу склала -0,0035 с, для телескопа КТ-50 склала +0,0025 с.

ВИСНОВКИ

Відкритий Інтернет ресурс Space-Track не дає повну інформацію про ситуацію на низьких навколоземних орбітах, тому актуальними є задачі незалежного контролю орбіт КА та високоточного визначення орбіт окремих об'єктів КС розміром від 10 см. Для ефективного вирішення цих задач може бути застосована розподілена мережа оптичних телескопів з простою конструкцією.

В дисертаційній роботі, з метою формування каталогу екваторіальних координат НКО, вирішена актуальна науково-технічна задача впровадження комбінованого методу для спостереження НКО із застосуванням способів формування зображення об'єкту на нерухомому телескопі з часом накопичення, який не обмежений видимою швидкістю руху об'єкту.

В результаті досліджень були отримані наступні нові наукові результати.

1. Запропоновано використання способу накопичення кадрів зі зсувом для формування зображень НКО на нерухомому телескопі із застосуванням телевізійних ПЗЗ-камер. Перевагою запропонованого способу, у порівнянні з прямим накопиченням кадрів, є відсутність обмеження експозиції видимою швидкістю об'єкту. Спосіб НКЗ може буди застосований для позиційних спостережень НКО комбінованим методом.

2. Розроблено спосіб вкороченого синхронного переносу заряду для формування зображень астрономічних об'єктів на нерухомому телескопі із застосуванням повнокадрових ПЗЗ-камер та поворотної платформи. Перевагою способу ВСПЗ у порівнянні із застосуванням звичайного синхронного переносу заряду є можливість встановлення експозиції меншої ніж час проходження об'єкта через поле зору телескопа. Спосіб ВСПЗ може буди застосований для позиційних спостережень КО та АЗЗ комбінованим методом.

3. Комбінований методу ПЗЗ спостережень впроваджений для спостереження НКО, для визначення екваторіальних координат НКО застосовано модифіковану модель редуції.

4. Запропоновані способи формування зображення НКЗ та ВСПЗ та комбінований метод ПЗЗ-спостережень були застосовані автором при розробці

програмного комплексу для спостереження КО та АЗЗ. Розроблений ПК впроваджений та застосовується для проведення спостережень на усіх телескопах НДІ МАО та частково на телескопах в АО ЛНУ, ЛКД УжНУ та ДМЦ “Оріон”.

5. Впровадження способу НКЗ дозволило створити в НДІ МАО автоматичну систему спостереження НКО із застосуванням телевізійної ПЗЗ-камери та фотографічного об'єктиву (телескоп ТВТ). Створена система може бути використана для контролю орбіт низькоорбітальних КА. Впровадження способу ВСПЗ дозволило створити в НДІ МАО автоматичну систему спостереження КО та АЗЗ із застосуванням повнокадрової ПЗЗ-камери (телескоп КТ-50). Створена система може бути використана для уточнення відстані зближення об'єктів КС з функціонуючими КА на низьких орбітах.

6. Зі спостережень, виконаних на телескопі ТВТ із застосуванням НКЗ, отримано 40441 положення 195 НКО з блиском 5–11^m та розміром від 1 м. Зі спостережень, виконаних на телескопі КТ-50 із застосуванням ВСПЗ, отримано 1399 положень 46 НКО з блиском 7–15^m та розміром від 10 см. Отримані результати оформлені у вигляді каталогу положень. Визначено похибку положень НКО та проведено аналіз її залежності від умов спостереження. Для спостережень на телескопі ТВТ похибка положень склала $\pm 2,5''$, на телескопі КТ-50 склала $\pm 0,6''$. Визначено (О-С) положень НКО. СКВ апроксимуючих кривих (О-С) для спостережень на телескопі ТВТ склало $\pm 1,5''$, на телескопі КТ-50 склало $\pm 1,2''$. За (О-С) положень визначена похибка реєстрації моментів часу ПЗЗ-кадрів з точністю не гірше 0,001 с.

7. Отримані положення НКО були використані у СКАКО України, у НДІ АО ОНУ для поліпшення моделі руху НКО, у зведеному каталозі положень КО отриманому Українською мережею оптичних станцій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Козырев Е.С. Реализация комбинированного метода в НИИ НАО для наблюдения геосинхронных спутников / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Odessa Astronomical Publications*. – 2007. – V. 20, № 2. – P. 53–54.

2. Shulga O. Observation of the fast NEO objects with prolonged exposure/ Shulga O., Kozyrev Y., Sibiryakova Y. // *Proc. of IAU Symposium № 248 «A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry»*. – Shanghai, 2007. – P. 128–129.

3. Козырев Е.С. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Космічна наука і технологія*. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 71–76.

4. Козырев Е.С. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием способа накопления кадров со смещением / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Космічна наука і технологія*. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 83–87.

5. Kara I.V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects / Kara I.V., Kozyrev Y.S., Sibiryakova Y.S., Shulga O.V. // *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*, – 2011, – V. 107, P. 98–102.

6. Шульга А.В. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства / Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Халалей М.И., Чернозуб В.М. // *Космічна наука і технологія*. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 52–58.
7. Куличенко Н. А. / Использование ТВ-камер для наблюдений метеоров / Куличенко Н. А. Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С. // *Космічна наука і технологія*. – 2012. – Т. 18, № 6., С. 67–72.
8. Козырев Е.С. Комп'ютерна програма “Обработка видеосигнала изображения зоряного неба для завдань астрономії” (VideoTracking) / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 9397 від 19.02.2004 р.
9. Козырев Е.С. Комп'ютерна програма “Реєстрація метеорних явищ з використанням телевізійних камер” (MeteorDetect) / Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37593, від 25.03.2011.
10. Козырев Е.С. Регулярные наблюдения геостационарных спутников комбинированным ПЗС-методом / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Проблемы управления и информатики*. – 2004. – № 5. – С. 39–45.
11. Козырев Е.С. Средства и методы наблюдений объектов околоземного космического пространства НИИ Николаевская астрономическая обсерватория / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Украинский аэрокосмический журнал*. – Николаев, 2009. – № 1 (3). – С. 50–56.
12. Базей А. А. Использование телескопа САК-300 для ведения каталога искусственных спутников Земли в НИИ НАО / Базей А.А., Ковальчук А.Н., Козырев Е.С., Лаврухина Р.В., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Труды конференции “Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы”*. – Николаев, 2007. – С. 126–132.
13. Козырев Е.С. Применение поворотной платформы для наблюдений объектов околоземного пространства комбинированным методом / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Сборник трудов конференции “Околоземная астрономия 2007”*. – Нальчик, 2008. – С. 288 – 292.
14. Козырев Е.С. Автоматические наблюдения объектов на геостационарных и низких орбитах на телескопе САК в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» / Козырев Е.С., Ковальчук А.Н., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // *Радиотехнические тетради*. – 2008. – № 36. – С. 42.
15. Сибирякова Е.С. Методы проведения и обработки наблюдений ИСЗ в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» / Сибирякова Е.С., Козырев Е.С., Шульга А.В. // *Радиотехнические тетради*. – 2008. – № 36. – С. 43.
16. Козырев Е.С. Совместный проект НИИ «Николаевская Астрономическая Обсерватория» и Львовской астрономической обсерватории по позиционным наблюдениям ИСЗ / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В., Апунович С.В., Билинский А.И., Благодар Я.Т., Вирун Н.В., Вовчик Е.Б., Логвиненко А.А., Мартынюк-Лотоцкий К.П. // *Сборник трудов конференции «Околоземная астрономия 2007»*. – Нальчик, 2008. – С. 326–331.
17. Shulga O. Observation of NEO having high apparent rates with Mobitel telescope / Shulga O., Kozoryev Y., Sybiryakova Y. // *Proc. Of Gaia follow-up network for solar system objects workshop*. – IMCCE-Paris observatory, France, 2011. P. 97–100.

18. Козырев Е.С. Регулярные наблюдения геостационарных спутников комбинированным ПЗС методом / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Сборник тезисов Третьей Украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. – Кацевели, 2003. – С. 170.

19. Bazey A. Telescopes for observation of artificial satellites of the Earth in the research institute NAO / Bazey A., Kovalchuk A., Kozirev E., Sibiryakova E., Shulga A. // Proceedings of the International conference “Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes”. – Nikolaev, 2004. – P. 18.

20. Базей А.А. Комплекс ПЗС-телескопов НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» для наблюдений ИСЗ и космического мусора / Базей А.А., Ковальчук А.Н., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Сборник тезисов международного научного семинара “Наблюдения искусственных спутников Земли и космического мусора”. – Львов, 2004. – С. 28.

21. Базей А.А. Ведение каталога искусственных спутников Земли в НИИ «НАО» / Базей А.А., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Сборник тезисов 9-й международной конференции “Системный анализ и управление”. – Евпатория, 2004. – С. 112.

22. Shulga A. Observations of artificial Earth satellites / Shulga A., Bazey A., Kozirev E., Sibiryakova E. // Abstract Book of the International conference “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future”. – Kiev, 2004. – P. 169.

23. Kovalchuk A. Development and application of the combined method of CCD observations / Kovalchuk A., Kozirev E., Lavruhina R., Sybiryakova E., Shulga A. // Abstract Book of the International conference “Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System”. – Nikolaev, 2006. – P. 60.

24. Козырев Е.С. Исследование точности вычисления экваториальных координат при наблюдениях комбинированным методом / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Всероссийская Астрономическая Конференция. – Нижний Архыз, 2010. – С. 17.

25. Козырев Е.С. Наблюдение АСЗ с высокой эфемеридной скоростью / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Всероссийская Астрономическая Конференция. – Нижний Архыз, 2010. – С. 17–18.

26. Kozyruev Y. S. Observations of natural and artificial objects in near-Earth space using the combined observation method / Kozyruev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O.V. // International Conference “Astronomical research: from near-Earth space to the Galaxy”. – Mykolaiv: Atoll, 2011. – P. 35.

27. Shulga A. Using of Optical Means and Methods in RI NAO for Observation of Near-Earth Space Objects / Shulga A., Kozyruev Y., Sybiryakova Y., Kovalchuk A. // International Conference “Astronomical research: from near-Earth space to the Galaxy”. – Mykolaiv: Atoll, 2011. – P. 50.

28. Шульга А. В. Наблюдение объектов околоземного космического пространства на телескопах НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» / Шульга А. В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С. // Тезисы 32 международной

конференції «Наука и техника: Вопросы истории и теории». – Санкт-Петербург, Россия, 2011. – С. 146–147.

29. Сибирякова Е.С. Внедрение новых методов наблюдений на телескопах НИИ НАО и других обсерваторий Украины / Сибирякова Е.С., Козырев Е.С., Шульга А. В., Благодыр Я.Т. и др. // ABSTRACTS 11 th Ukrainian conference on space research. – Yevpatoria, 2011. – P. 130.

30. Olexandr V. Shulga, NAO and SHAO participation in the near-Earth space observations / Olexandr V. Shulga, Yevgen Kozyryev, Yevgeniya Sybiryakova, Zhenghong Tang, Yindun Mao, Yan Li, Yong Yu // Abstract Book of IAU XXVIII General Assembly. – Beijing, 2012. – P. 1253.

31. Козырев Е.С. Наблюдения объектов околоземного космического пространства в НИИ Николаевская астрономическая обсерватория / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Сборник тезисов всероссийской астрометрической конференции "Пулково-2012". – Санкт-Петербург, 2012. – С. 30.

32. Козырев Е.С. Наблюдения космических объектов в НИИ НАО проведенные в рамках работ запланированных УМОС / Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. // Сборник тезисов первой всеукраинской конференции «Лазерная локация и оптические наблюдения космических объектов». – Алчевск, 2012. – С. 5.

АНОТАЦІЯ

Козирев Є.С. Застосування комбінованого методу спостережень для формування каталогу положень низькоорбітальних космічних об'єктів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 – Астрометрія та небесна механіка. – Національний Авіаційний університет, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Київ, 2013.

Дисертацію присвячено застосуванню нових методів позиційних спостережень низькоорбітальних космічних об'єктів на нерухомому телескопі із застосуванням комбінованого методу ПЗЗ-спостережень та оригінальних способів формування зображення.

Для телевізійних ПЗЗ-камер запропоновано спосіб накопичення кадрів зі зсувом, який у порівнянні з прямим накопиченням кадрів немає обмеження експозиції видимою швидкістю об'єкту. Для повнокадрових ПЗЗ-камер з поворотною платформою запропоновано спосіб вкороченого синхронного переносу заряду, який у порівнянні з класичним застосуванням режиму синхронного переносу заряду дозволяє використовувати експозицію меншу ніж час проходження об'єкта через поле зору телескопа.

Проведені спостереження низькоорбітальних космічних об'єктів, сформовано каталог положень. Проведена оцінка випадкових та систематичних похибок отриманих положень низькоорбітальних космічних об'єктів.

Ключові слова: позиційні спостереження, низькоорбітальні космічні об'єкти, метод ПЗЗ-спостережень, каталог положень.

АННОТАЦИЯ

Козырев Е.С. Применение комбинированного метода наблюдений для формирования каталога положений низкоорбитальных космических объектов.
– На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика. – Национальный Авиационный университет, Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины, Киев, 2013.

Диссертация посвящена применению новых методов позиционных наблюдений низкоорбитальных космических объектов на неподвижном телескопе с применением комбинированного метода ПЗС-наблюдений и оригинальных способов формирования изображения.

Открытый интернет ресурс Space-Track предоставляет элементы орбит всех низкоорбитальных космических объектов (НКО) размером от 10 см. Эфемериды рассчитанные по данным Space-Track, могут быть использованы для прогноза опасных сближений функционирующих космических аппаратов с другими НКО. Однако этой информации недостаточно для определения вероятности столкновения, поэтому существует задача проведения высокоточных наблюдений отдельных низкоорбитальных объектов размером от 10 см. Задача независимого контроля орбит космических аппаратов представляет национальный интерес для многих стран ведущих космическую деятельность. Приведенные задачи могут быть решены распределенной сетью оптических телескопов. Создание такой сети может быть целесообразным с применением систем наблюдения НКО без механического сопровождения.

Способ накопления кадров со смещением (англ. stack-and-track technique), применяемый при наблюдении астероидов с известной орбитой, был предложен автором для формирования изображений НКО на неподвижном телескопе, оснащенный телевизионной ПЗС камерой и фотографическим объективом.

Режим синхронного переноса заряда (англ. Time delay integration) полнокадровых ПЗС-камер применяется для получения сканов звездного неба на неподвижном телескопе. Особенностью этого режима является то, что экспозиция равна времени прохождения наблюдаемого объекта через поле зрения телескопа, что не приемлемо для наблюдения НКО. Для устранения этого недостатка автором был предложен способ укороченного синхронного переноса заряда.

Комбинированный метод ПЗС-наблюдений (КМН) разработан в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) для определения положений космических объектов, имеющих значительную видимую скорость относительно звезд, на телескопе, который остается неподвижным во время формирования ПЗС-кадров. Суть КМН заключается в формировании изображений объекта и опорных звезд на отдельных кадрах с применением разных параметров формирования изображения. При применении КМН формируются невытянутые изображения объекта и опорных звезд. Для расчета экваториальных координат НКО по наблюдениям, полученным комбинированным методом, применялась модифицированный метод редукции наблюдений.

Автором разработан программный комплекс для автоматического наблюдения и обработки полученных изображений с использованием КМН и предложенных способов формирования изображения. Разработанный программный комплекс внедрен и применяется на всех телескопах НИИ НАО для наблюдения искусственных спутников Земли на любых околоземных орбитах, астероидов сближающихся с Землей и метеоров. Программный комплекс внедрен на телескопах АО ЛНУ, ЛКИ УжНУ и ГМЦ “Орион” для наблюдения НКО с применением телевизионных ПЗС камер.

На телескопе ТВТ комплекса МОБИТЕЛ НИИ НАО, оснащено телевизионной ПЗС-камерой и фотографическим объективом, получено 40441 положений 195 объектов с блеском 5–11^m включая объекты размером 1 м. На телескопе КТ-50 комплекса МОБИТЕЛ НИИ НАО, оснащено полнокадровой ПЗС-камерой, получено 1399 положений 46 объектов с блеском 7–15^m, включая объекты размером 10 см. Полученные данные оформлены в виде каталога положений.

Погрешность положений НКО была определена по невязкам расчета орбиты и составила по наблюдениям на телескопе ТВТ – $\pm 2,5''$, по наблюдениям на телескопе КТ-50 – $\pm 0,6''$. По эфемеридам международной службы лазерной локации были определены (О–С) положений НКО. СКО аппроксимирующих кривых (О–С) для наблюдений на телескопе ТВТ составило $\pm 1,5''$, на телескопе КТ-50 составило $\pm 1,2''$.

Ключевые слова: позиционные наблюдения, низкоорбитальные космические объекты, метод ПЗС-наблюдений, каталог положений.

ABSTRACT

Kozyryev Y.S. Application of the combined observation method for catalogue of positions of low Earth orbit space objects. – As Manuscript.

Dissertation for the candidate's degree of physical and mathematical sciences in a specialty 01.03.01– astrometry and celestial mechanics. – National Aviation University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2013.

Dissertation is dedicated to the application of new methods of positional observations of low Earth orbit space objects with fixed telescope using the combined CCD-observation method and original imaging modes.

The frame accumulation with shift mode was suggested for television CCD cameras. In comparison with direct accumulation mode suggested mode has no exposure limiting on object apparent speed.

The short drift-scan mode was suggested for full-frame CCD cameras. In comparison with classical use of drift-scan mode suggested mode allows to use exposure time less than the time of object passage through the telescope field of view.

Observations of low Earth orbit space objects were carried out and catalogue of positions was created. Random and systematic errors of obtained positions of low Earth orbit space objects were estimated.

Keywords: coordinate observations, low Earth orbit space objects, CCD observation method, catalogue of positions.