

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Шульга Олександр Васильович

УДК 522.33-38:523.812

**МОНІТОРИНГ ОБ'ЄКТІВ
НАВКОЛОЗЕМНОГО КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ
НАЗЕМНИМИ ОПТИЧНИМИ ТА РАДІО ЗАСОБАМИ**

01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

АВТОРЕФЕРЕТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» Міністерства освіти і науки України.

Офіційні
опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Зазуляк Петро Михайлович,
Інститут геодезії Національного університету
«Львівська політехніка» МОН України,
професор кафедри картографії та геопросторового
моделювання;

доктор фізико-математичних наук, професор
Железняк Олег Олександрович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри аерокосмічної геодезії;

доктор фізико-математичних наук, професор
Джунь Йосип Володимирович,
Міжнародний економіко-гуманітарний університет
імені академіка Степана Дем'янчука МОН України,
завідувач кафедри математичного моделювання
факультету кібернетики.

Захист відбудеться 17 квітня 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України (ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, Київ).

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, Київ).

Автореферат розісланий 16 березня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В теперішній час спостерігається тенденція розширення використання сучасних оптичних та радіо засобів для спостереження космічних об'єктів (КО) в навколосемному космічному просторі (НЗКП). НЗКП визначається як простір між лінією Кальмана (100 км від поверхні Землі) і сферою Хілла (відстань у 930 000 км від Землі).

Така тенденція викликана необхідністю вирішення наступних проблем:

- астероїдно-кометної і пов'язаної з нею метеорної небезпеки, для тіл природного походження на навколосонячних орбітах,
- контролю орбітального руху та взаємного зближення штучних супутників Землі (ШСЗ) та "космічного сміття" (КС), для тіл техногенного походження на навколосемних орбітах.

Об'єктами дослідження в задачі астероїдної небезпеки є астероїди, що зближуються з Землею (АЗЗ), орбіти яких мають перигелійну відстань $q < 1.3$ а.о., і особливо потенційно небезпечні астероїди (ПНА), які зближуються з Землею на відстань, що не перевищує 7.5 млн. км (0.05 а.о.). На сьогоднішній день у світі функціонують декілька основних систем оптичних спостережень АЗЗ та ПНА: Catalina Sky Survey – США; Pan-STARRS – міжнародний проект Німеччини, Великої Британії, Тайваня та США; Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) – спільний проект військово-повітряних сил США, НАСА і лабораторії Лінкольна Массачусетського технологічного інституту США; Spacewatch – Університету Арізони США.

Вище зазначені системи успішно виконують функцію пошуку АЗЗ розміром до 100 м на відстанях близько 0.5–1.0 а.о. В той самий час АЗЗ розміром ~ 10 м можна зареєструвати лише на відстані ~ 0.05 а.о., тобто практично всі такі АЗЗ відносяться до категорії ПНА. Час спостереження таких ПНА, для уточнення параметрів орбіти, становить не більше 3–7 днів. У період зближення ПНА з Землею їх спостереження проводяться на телескопах, які мають світлосилу не більше 0.025. У період максимального зближення з Землею ПНА розміром менше 10 м спостерігаються на сучасних телескопах (світлосила ~ 0.25 + надчутлива ПЗЗ-камера). Такі телескопи мають значну вартість і доступні лише заможним країнам.

Безпосередньо з проблемою астероїдно-кометної небезпеки пов'язано і проблему метеорної небезпеки. Метеори чи боліди є проявом проходження в щільних шарах атмосфери метеороїдних тіл, що згідно усталеної класифікації визначаються як тіла діаметром від 100 мкм до 10 м, що

рухаються навколосонячними орбітами. Основні метеороїдні потоки пов'язані з кометами, що розпалися внаслідок впливу Сонця, і містять на 99 % пил і лід розміром 0.1 см та тіла розміром до 10 см, що згорають в атмосфері Землі. Більш небезпечними є метеороїдні потоки, пов'язані з астероїдами, оскільки в їх складі знаходяться кам'яні тіла розміром 1–10 м. Проходження таких тіл в атмосфері Землі проявляються в вигляді болідних явищ і випаданням метеоритів на поверхню Землі. За рік на Землі спостерігається близько 30 000 болідів, але передбачити їх падіння поки що не вдавалось, включаючи челябінський метеорит, який найімовірніше мав розмір 4–5 м.

Оптичними спостереженнями метеорних та болідних явищ займаються астрономи в 43-х країнах світу, які співпрацюють під егідою Міжнародної метеорної організації. Результати спостережень концентруються в Центрі метеорних даних IAU, який існує на базі Астрономічного інституту Словацької академії наук, під егідою відділу F (планетних систем і біоастрономії).

На навколосонячних орбітах особливо важливою задачею є контроль орбітального руху та взаємного зближення ШСЗ та КС. Зокрема, оптичні засоби спостереження відіграють особливу роль при формуванні каталогів космічних об'єктів, а також, враховуючи їх високу роздільну здатність і прецизійну точність, з їх допомогою можливо:

- високоточне визначення координат КО, ведення їх прецизійних каталогів, зокрема це особливо стосується навігаційних, топогеодезичних супутників і супутників дистанційного зондування Землі,
- каталогізування КО, які недоступні для спостереження за допомогою існуючих космічних радіолокаторів, а саме – геостаціонарні супутники (ГСС), тісні угруповання КО, групування КО на перших витках виведення їх на орбіту ШСЗ, до того ж часто оптичні спостереження є мало не єдиним засобом їх роздільного спостереження,
- каталогізування дрібних об'єктів КС.

На початок 2012 року в навколосонячному космічному просторі на висотах 100–36000 км зареєстровано близько 16000 КО штучного походження розміром від 10 см, з яких близько 79% складають низькоорбітальні космічні об'єкти (НКО) з висотою орбіти 100–2000 км. Близько 90% від загальної кількості КО складає КС. 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 оптичних та радіотелескопів США для контролю

космічного простору. Space-Track містить елементи орбіт усіх об'єктів КС на низьких орбітах розміром від 10 см, які становлять загрозу для ШСЗ. Ефемериди, розраховані за даними Space-Track, можуть бути використані для прогнозування небезпечних зближень КС з ШСЗ, але вони не достатньо точні для визначення імовірності зіткнення. Тому існує потреба у високоточному визначенні орбіт об'єктів КС розміром від 10 см, для яких є прогноз потенційно небезпечного зближення з ШСЗ. На геостаціонарних орбітах у період 2014–2042 років ймовірність зближення ГСС з КС збільшиться в 3–6 разів. Такий стан справ зумовлений поверненням в площину екватора більшості ГСС, які були запуснені починаючи з 1960 року, і мають період повернення близько 53-х років.

На геостаціонарних орбітах особливими об'єктами є працюючі телекомунікаційні ГСС (ТК ГСС). Ці супутники знаходяться у визначених точках стояння по довготі на відстанях $\sim 0.1^\circ$, що на орбіті складає близько 60 км. Таке тісне розміщення потребує розробки і впровадження радіотехнічних комплексів неперервного контролю орбітального положення ТК ГСС. Такі комплекси розробляються з використанням методу радіоінтерферометра і діють у США, ЄС та Китаї.

Актуальність розвитку в Україні наведених вище задач контролю КО в НЗКП обумовлена необхідністю розробки і впровадження в практику спостережень методів, що забезпечують їх рішення на малих телескопах, які мають астрономічні обсерваторії України, або на недорогих автоматизованих телескопах і технічних комплексах, які можуть бути виготовлені в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою частиною дев'яти фундаментальних робіт Науково-дослідного інституту “Миколаївська астрономічна обсерваторія” (НДІ МАО), керівництво якими виконував здобувач:

Тема “Геокосмос” – Дослідження астрометричних та фізичних характеристик об'єктів ближнього космосу. 2000–2004 рр., №0101U000217.

Тема “РобоТел” – Створення нових телескопів-роботів для наземної астрометрії, що використовують сучасні методи та засоби реєстрації. 2004–2006 рр., №0104U000566.

Тема “ДІОР” – Вивчення впливу чинників природного і техногенного характеру на динаміку орбіти штучних супутників Землі. 2005–2007 рр., №0105U000392.

Тема “МобіТел” – Астрометричні та фотометричні наземні дослідження тіл Сонячної системи з застосуванням мобільного телескопа-робота. 2007–2009 рр., №0107U002163.

Тема “ОРАДОК” – Дослідження навколоземного космічного простору наземними оптичними та радіотехнічними засобами. 2008-2010 рр., №0108U000595.

Тема “Метеоріод” – Визначення високоточних координат об’єктів природного походження, що максимально наблизились до Землі, із застосуванням оригінальних ПЗЗ-технологій. 2010–2012 рр., №0110U000259.

Тема “ФАВОР” – Дослідження динаміки орбітального руху об’єктів навколоземного космічного простору за результатами спостережень наземними оптичними та радіотехнічними засобами. 2011–2013 рр., №0111U000084.

Тема “АсКом” – Дослідження астероїдів, комет та метеорів для задач астероїдно-кометної безпеки оптичними та радіотехнічними засобами. 2013–2015 рр., №0113U003109.

Тема “ОКО” – Визначення та уточнення орбітальних параметрів штучних об’єктів навколоземного космічного простору за наземними оптичними та радіотехнічними спостереженнями. 2014–2016 рр., №0114U003049.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в оперативному контролі орбітальних параметрів КО, які знаходяться в НЗКП, за результатами високоточних координатних спостережень положень КО, отриманих з використанням оптичних та радіо засобів, і включенні до баз даних, представлених у мережі Інтернет.

Оперативне визначення орбітальних параметрів КО та прогноз їх варіацій внаслідок впливу чинників природного та техногенного характеру забезпечують контроль:

- орбітальних параметрів КО у формі каталогів,
- зближення КО з Землею,
- ймовірності падіння КО на поверхню Землі,
- приналежності КО до орбітальної структури материнського тіла або популяції однотипних КО,
- взаємного зближення КО та вірогідності їх співудару.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати наступні завдання:

1. Розробити та впровадити як основний комбінований метод спостереження (КМС), який реалізує рознесені в часі спостереження КО і опорних зір. Розробити КМС для повнокадрової ПЗЗ-камери у вигляді комбінування різних режимів роботи – кадрового та синхронного переносу заряду. Розробити метод накопичення кадрів зі зсувом (МНКЗ) для телевізійної ПЗЗ-камери. Практично забезпечити отримання зображення КО та опорних зір у формі точок при будь-яких їх взаємних швидкостях і

напрямок руху.

2. Розробити нові та модернізувати наявні телескопи для реалізації спостережень з використанням КМС та МНКЗ. Оснастити комплекс телескопів НДІ МАО сучасними ПЗЗ-камерами, механічними приводами та системою програмного управління з доступом через Інтернет. Впровадити методи на телескопах обсерваторій України через технічну реалізацію в конструкції телескопів та встановлення програм управління та обчислення. Забезпечити функціонування обсерваторій в рамках мережі – Української мережі оптичних станцій (УМОС) з дослідження навколосемного космічного простору.

3. Провести масові оптичні спостереження КО в НКЗП на телескопах НДІ МАО та обсерваторіях УМОС з формуванням об'єднаних баз даних спостережень КО. Представити результати спостережень КО в провідних світових базах даних.

4. Розробити та впровадити в обробку оптичних спостережень КО модифіковані формули координатної та фотометричної редукції.

6. Забезпечити розробку та впровадження в практику наукових і прикладних робіт оригінальне програмне забезпечення для розрахунку елементів збуреної орбіти КО на навколосемних орбітах.

7. Представити результати спостережень КО на навколосемних орбітах в формі Інтернет-ресурсу:

- FTP-сервера для первинних спостережень,
- сайта для загальної інформації та для представлення елементів збуреної орбіти КО.

8. Розробити і впровадити радіометоди та радіотехнічні комплекси для визначення координат X, Y, Z ТК ГСС у системі координат WGS84.

9. Забезпечити використання у програмах національного і міжнародного рівня розроблених методів спостережень, технічних пристроїв та програмного забезпечення для оптичних та радіо засобів спостереження.

Об'єкт дослідження. АЗЗ, ПНА, метеори та штучні космічні об'єкти на навколосемних орбітах.

Предмет дослідження. Екваторіальні координати, елементи орбіт та ефемериди КО, визначені за результатами координатних спостережень.

Методи досліджень. Для спостережень ПНА використано телескопи світлосилою $f/6.0-f/1.8$, на яких реалізована технологія синхронного переносу заряду повнокадрової ПЗЗ-камери. Ця технологія спостережень дає змогу отримувати високоточні координатні спостереження ПНА розміром близько 10 м у періоди максимального зближення з Землею на недорогих телескопах стандартної комплектації.

Для спостереження КО на навколоземних орбітах запропоновано і реалізовано такі методи: КМС, вкороченого синхронного переносу заряду (ВСПЗ) з використанням повнокадрових ПЗЗ-камер, МНКЗ для телевізійних камер, радіоінтерферометричних спостережень ТК ГСС.

Головним результатом використання КМС та методів ВСПЗ і МНКЗ є отримання круглих зображень опорних зір та КО, які рухаються зі швидкостями до $2^\circ/\text{хв}$. під будь-яким кутом до видимого руху опорних зір.

Для розрахунку екваторіальних координат КО використано модифікований метод редукції, розроблений в НДІ МАО для обчислення спостережень, отриманих КМС, методом ВСПЗ та МНКЗ.

З використанням МНКЗ створено мережу автоматичних оптичних метеорних телескопів (МТ), які розміщено на відстані 12 км один від одного. Цілодобово працюючі МТ мають неперервний доступ до мережі Інтернет, що забезпечує формування баз даних спостережень у режимі реального часу. Обчислення метеорних спостережень з використанням модифікованих формул координатної редукції забезпечує розрахунок високоточних радіантів метеорних потоків та елементів орбіти індивідуальних метеорів.

Для підвищення в 5–10 разів точності розрахунку елементів орбіти вибраного класу КО (ТК ГСС) використано інтерферометричний метод визначення їх координат X , Y , Z у системі координат WGS84. Метод базується на кореляційному обчисленні відносних затримок сигналів супутникового телебачення, синхронно отриманих на рознесеній мережі приймальних станцій, встановлених у містах – Київ, Миколаїв, Мукачеве, Харків.

Наукова новизна одержаних результатів. Під час виконання роботи отримано наступні нові результати:

1. Зі спостережень на телескопах ШАК та МОБІТЕЛ (КТ-50) одержано каталог 4042 положень АЗЗ та ПНА 13^m - 18.5^m , які спостерігались на віддалі 0.002–1.0 а.о. від Землі. Каталог отримано в системі ICRS, середньоквадратична похибка (СКП)= $\pm(0.1-0.6)''$. Всі положення прийняті до Minor Planet Center.

2. Виконано регулярні оптичні спостереження КО на навколоземних орбітах з використанням комплексу автоматичних телескопів НДІ МАО і інших обсерваторій УМОС. Отримано спостережень КО: 159467 – на низьких орбітах, СКП= $\pm(1-5)''$; 2103 – на середніх орбітах, СКП= $\pm(0.5-3)''$; 4422 – на геостаціонарних орбітах, СКП= $\pm(0.1-1)''$. Похибка спостережень КО на геостаціонарних орбітах відповідає кращим світовим зразкам, а на низьких і середніх орбітах краща за світові дані для оптичних телескопів.

3. Вперше забезпечено регулярне ведення каталогу елементів збуреної орбіти 982 КО (висоти орбіт: 896 – низькі, 47 – середні, 39 –

геостаціонарні) з використанням спостережень оптичними наземними, автоматизованими телескопами малої апертури. Для ведення каталогу розроблено та забезпечено функціонування спеціалізованого сайту УМОС.

4. Вперше проводиться безперервне визначення геоцентричних координат X , Y , Z у системі координат WGS84 ТК ГСС методом радіоінтерферометрії, а саме кореляційною обробкою сигналів супутникового телебачення. СКП визначення координат X , Y , Z склала 3200 м, 640 м і 400 м відповідно.

5. Вперше впроваджено в практику контролю навколосемного космічного простору комбінований ПЗЗ-метод спостережень з використанням повнокадрових та телевізійних ПЗЗ-камер.

6. Вперше розроблено, створено і введено до постійної експлуатації в режимі автоматичних спостережень КО (АЗЗ, ПНА, метеори, ШСЗ та КС) в НЗКП комплекс оптичних телескопів НДІ МАО оригінальної конструкції, обладнаних ПЗЗ-камерами. До комплексу входять:

- швидкісний автоматичний комплекс (ШАК),
- мобільний телескоп (МОБІТЕЛ) (у складі кінотелескопа КТ-50, телескопа «Мезон» та телевізійного телескопа (ТВТ)),
- супутникова камера АФУ-75 (реконструйована),
- комплекс МТ для базисних спостережень.

7. Розроблено та впроваджено в практику спостережень комплекс автоматичних, телескопічних метеорних телескопів для моніторингу метеорів. Автоматичні спостереження ґрунтуються на використанні оригінальної методики детектування метеорів у відеопотоці телевізійних ПЗЗ-камер. Отримано 4135 однопунктних спостережень метеорів, для ототожнення з метеорними потоками статистичним методом, а також спостереження 328 базисних метеорів для розрахунку високоточних радіантів метеорних потоків. Середньозважена похибка визначення радіантів склала $\pm 0.^\circ 1$ за прямим піднесенням та $\pm 0.^\circ 3$ за схиленням.

8. Розроблено та впроваджено в практику регулярних спостережень радіотехнічні комплекси для спостережень ТК ГСС методом радіоінтерферометрії.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Каталог КО НДІ МАО використовується як складова частина Системи контролю та аналізу космічної обстановки (СКАКО) Національної космічної програми України.

2. Розроблені в НДІ МАО за участю автора поворотні платформи для повнокадрових ПЗЗ-камер використовуються на телескопах Національного центру управління та випробування космічних засобів Державного

космічного агентства України (ДКАУ) та Шанхайської астрономічної обсерваторії КНР.

3. Розроблені в НДІ МАО за участю автора КМС та МНКЗ для малокадрових і телевізійних камер використовуються на телескопах обсерваторій України та КНР.

4. Комплекс автоматичних телескопів, що функціонує в НДІ МАО, забезпечив контроль запусків ракетноносіїв “Дніпро”, які виготовляються за участю України.

5. За участю автора забезпечено функціонування всеукраїнської мережі УМОС з використанням методів та технічних засобів, розроблених у НДІ МАО.

6. Забезпечено функціонування всеукраїнської мережі з контролю орбітального положення ТК ГСС методом радіоінтерферометрії з метою координатної підтримки національної супутникової системи зв’язку.

7. Результати методичних та апаратних розробок за темою дисертації використано при виконанні 34 договорів в період з 2003 до 2014 рр. Договори виконувались в межах:

- Національної космічної програми України: Державне підприємство науково-дослідний і проектний інститут “СОЮЗ”, м. Харків – 6 договорів за тематикою «Модернізація», Національний центр управління та випробування космічних засобів, м. Євпаторія – 8 договорів за тематикою «Сажень-С», ДКБ «Південне», м. Дніпропетровськ – 11 договорів за тематикою «Дніпро» та «Спостереження», Інститут космічних досліджень НАНУ–ДКАУ – договір за тематикою «Модернізація»;

- цільової комплексної програми наукових досліджень Національної академії наук України (НАНУ): Головна астрономічна обсерваторія (ГАО НАНУ), м. Київ – 3 договори;

- бюджетної програми «Реалізація двосторонніх міжнародних програм»: МОНУ, м. Київ – 3 договори.

Достовірність і обґрунтованість результатів.

Достовірність даних і їх обґрунтованість базуються на ретельному аналізі випадкових та систематичних похибок спостережень.

Проведено зовнішнє порівняння результатів спостережень з даними світових центрів за відповідними напрямками, а саме:

- АЗЗ та ПНА з даними Minor Planet Center,
- КО на навколоземних орбітах з даними International Laser Ranging Service,
- оптичних метеорів з даними Центру метеорних даних IAU.

Порівняння вказує на повну відповідність отриманих автором результатів кращим світовим даним.

Особистий внесок здобувача.

Всі результати, що представлені в дисертації, отримано або особисто дисертантом, або за його безпосередньою та визначальною участю. Автору дисертації належить постановка всіх задач, сформульованих у дисертаційній роботі. Автор приймав участь в отриманні всіх приведених у дисертації результатів від планування роботи до аналізу та інтерпретації.

Безпосередньо особистий внесок автора в друкованих роботах наступний:

[1] – проведено розрахунок астрономічних характеристик телескопів, оснащених повнокадровими ПЗЗ-камерами; [2] – обґрунтовано і показано на прикладах можливість використання повнокадрових ПЗЗ-камер для спостереження КО в НЗКП; [3] – запропоновано конструкцію ПЗЗ-камери Зонного астрографа НДІ МАО для спостережень АЗЗ; [4] – обґрунтовано необхідність проведення оптичних спостережень КО на ГСС-орбітах при проведенні VLBI-експериментів; [5] – обґрунтовано необхідність ведення каталогу КО на ГСС-орбітах, участь у розробці методики обчислення орбітальних параметрів КО на ГСС; [6] – обґрунтовано ефективність використання КМС для спостережень АЗЗ та ПНА; [7] – представлено пропозиції з впровадження КМС для спостережень КО на телескопах Шанхайської астрономічної обсерваторії; [8] – обґрунтовано важливість спостережень АЗЗ та ПНА на малих кутах елонгації; [9] – обґрунтовано ефективність використання АЗТ-8 для спостережень КО за програмами СКАКО, розраховано його астрономічні характеристики при оснащенні повнокадровими ПЗЗ-камерами; [10] – обґрунтовано методику обчислення елементів орбіти КО на навколосезних орбітах за даними оптичних спостережень; [11] – обґрунтовано актуальність спостережень ГСС з використанням КМС; [12] – обґрунтовано актуальність удосконалення формул астрометричної редукції при використанні КМС; [13] – проведено аналіз використання опорних систем координат при проведенні спостережень КО в НЗКП; [14] – обґрунтовано актуальність використання методу МНКЗ при спостереженнях низькоорбітальних КО; [15] – проведено аналіз точності використання каталогу геоцентричних векторів стану геосинхронних КО; [16] – проведено аналіз форм та методів створення веб-ресурсів для роботи з астрономічними даними; [17] – обґрунтовано конструкцію телескопа МОБІТЕЛ; [18] – обґрунтовано ефективність використання ТВ-камер для спостереження метеорів та запропоновано конструкцію метеороного телескопа; [19] – обґрунтовано можливість використання сигналів супутникового телебачення для визначення відстані до ТК ГСС; [20] – обґрунтовано ефективність використання КМС для спостережень АЗЗ та ПНА; [21] – проведено аналіз точності телевізійних спостережень метеорів у НДІ МАО; [22] – проведено аналіз точності

регулярних спостережень низькоорбітальних КО в НДІ МАО; [23] – проведено аналіз точності спостережень АЗЗ малих розмірів при малих кутах сонячної елонгації; [24] – обґрунтовано конструкцію телескопа ШАК, [25 – 29] – участь в постановці досліджень та проведенні аналізу результатів спостережень; [30] – обґрунтовано конструкцію поворотної платформи; [31] – обґрунтовано цілі спільного проекту; [32] – проведено аналіз результатів спостережень; [33] – проведено узагальнення результатів дослідження НЗКП в НДІ МАО; [34] – проведено узагальнення результатів приладобудування в НДІ МАО; [35] – проведено аналіз результатів спільних досліджень НДІ МАО та ШАО; [36] – проведено аналіз функціонування служби часу в НДІ МАО; [37 – 42] – обґрунтовано задачі та можливості мережі УМОС, та проведено аналіз результатів функціонування.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати, що увійшли до дисертації, представлялись та доповідались на:

1. Науковій конференції «Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел солнечной системы» (м. Обнінськ, Росія, 25–29 листопада 1999 р.).
2. Міжнародній конференції «Космічний захист Землі – 2000» (м. Євпаторія, 11–15 вересня 2000 р.).
3. Міжнародній конференції «Extension and Connection of Reference Frames using CCD ground-based Technique» (м. Миколаїв, 10–13 жовтня 2001р.).
4. 7-й міжнародній конференції «Optical and Radio Sources – Location and Connection» (м. Миколаїв, 22–23 травня 2003 р.).
5. Міжнародній конференції «Системный анализ и управление космическими комплексами» (м. Євпаторія, 1–7 липня 2002 р.).
6. VI-й міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і Космос» (м. Дніпропетровськ, 14–16 квітня 2004 р.).
7. Міжнародній конференції «Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes» (м. Миколаїв, 17–20 травня 2004 р.).
8. Міжнародній конференції «Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future» (м. Київ, 15–17 липня 2004 р.).
9. 9-й міжнародній конференції «Системный анализ и управление» (м. Євпаторія, 4–11 липня 2004 р.).
10. Міжнародній конференції «SIXTH U.S. – RUSSIAN space surveillance workshop» (м. С.-Петербург, Росія, 22–26 серпня 2005 р.).

11. VIII-й міжнародній молодіжній науково-практичній конференції “Людина і Космос” (м. Дніпропетровськ, 14–16 квітня 2006 р.).
12. Міжнародній конференції “Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System” (м. Миколаїв, 25–28 вересня 2006 р.).
13. IAU Symposium No. 248 “A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry” (м. Шанхай, КНР, 15–19 листопада 2007 р.).
14. II-й міжнародній науковій конференції «Наблюдение околоземных космических объектов» (м. Звенигород, Росія, 22–24 січня 2008 р.).
15. Всеросійській конференції «ВАК–2010» (м. Нижній Архиз, Росія, 13–18 вересня 2010 р.).
16. «Gaia follow-up network for Solar System objects workshop» (м. Париж, Франція, 29 листопада – 1 грудня 2010 р.).
17. Міжнародній конференції «Астрономические исследования: от ближнего космоса до Галактики» НАО190 (м. Миколаїв, 26–29 вересня 2011 р.).
18. «JENAM 2011 European Week of Astronomy and Space Science» (м. С.-Петербург, Росія, 4–8 липня 2011 р.).
19. IAU XXVIII General Assembly (м. Пекін, КНР, 20–31 серпня, 2012 р.).
20. «International meeting on variable stars research Kolos 2012» (м. Стакін, Словаччина, 6–8 грудня 2012 р.).
21. Четвертому міжнародному спеціалізованому симпозиумі (м. Євпаторія, 3–7 вересня 2012 р.).
22. An international conference on minor bodies in the Solar System Meteoroids 2013 (м. Познань, Польща, 26–30 серпня 2013 р.).
23. Міжнародній конференції «Околоземная астрономия 2013» (м. Туапсе, Росія, 7–11 жовтня 2013 р.).
24. International Workshop Gaia-FUN-SSO-3 (м. Париж, Франція, 24–26 листопада 2014 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 23 фахових виданнях [1–23], у тому числі в одному патенті [6], та 19 матеріалах конференцій [24–42]. Перераховані публікації були процитовані 31 раз у роботах, включених до бази даних SAO/NASA Astrophysic Data System (ADS).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку цитованої літератури (239 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 250 сторінок. Дисертація містить 158 рисунки, 31 таблицю і 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** розкрито актуальність теми досліджень, визначено предмет досліджень і зв'язок з науковими програмами і темами НДР НДІ МАО, сформульовано мету роботи і визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок дисертанта, приведено список публікацій автора, на яких базується представлена дисертаційна робота.

Розділ 1 містить огляд літератури за тематикою дисертації, в якому стисло розглянуто проблеми дослідження НЗКП. Дано визначення НЗКП та його основні фізичні характеристики. Також охарактеризовано кількісний склад КО природного та техногенного походження, які в тому чи іншому вигляді проявляються в НЗКП. До таких КО відносяться потенційно небезпечні астероїди та комети, метеорні та болідні тіла, діючі космічні апарати та космічне сміття.

Описано методи та основні характеристики телескопів, що використовуються для вирішення задачі астероїдно-кометної безпеки. Об'єктами таких досліджень є АЗЗ, у яких перигелійна відстань менше 1.3 а.о. На жовтень 2014 р. зареєстровано 11540 АЗЗ. Крім того, серед АЗЗ виділяють потенційно небезпечні астероїди – об'єкти, мінімальна відстань перетину з орбітою Землі яких дорівнює або менше 0.05 а.о. і абсолютна зоряна величина менше або дорівнює 22^m . На вересень 2014 р. зареєстровано 1508 ПНА. За даними проекту Near Earth Objects – Dynamic Site (NEODyS) за 2010 р. виявлено, що з 870 АЗЗ, відкритих у 2010 р., 36 % були відкриті на відстані менше 0.05 а.о. Високий відсоток нових об'єктів, відкритих при зближенні з Землею на відстані менше 0.05 а.о., пов'язаний із зростанням блиску АЗЗ, внаслідок чого об'єкти малого розміру стають доступні для спостережень. Особливо гостро ця проблема стоїть для АЗЗ діаметром менше 40 м. Такі об'єкти доступні для спостережень лише при тісному зближенні з Землею протягом малого періоду часу (до 7 днів), що не дозволяє отримати спостереження на дузі, достатній для обчислення елементів орбіт з високою достовірністю. Крім того, спостереження таких об'єктів ускладнені високою видимою швидкістю. Як наслідок, АЗЗ малого діаметра часто набувають статусу загублених.

В першому розділі розкрито роль і місце системи контролю космічного простору (СККП) провідних країн світу в задачі оцінки техногенної космічної обстановки. В своєму функціонуванні СККП керується принципами Комітету ООН з використання космічного простору в мирних цілях. В документі Комітету ООН «Керівні принципи Комітету з

використання космічного простору в мирних цілях і попередження утворення космічного сміття» затверджено керівні принципи попередження утворення КС. На січень 2015 р. у каталозі USSTRATCOM налічується 15084 об'єкти, з яких непошкоджені космічні апарати складають 25.2 %, а інші об'єкти – це КС.

В США контроль НЗКП здійснює система NORAD – об'єднана система аерокосмічної оборони США і Канади. Для досягнення місії аерокосмічного управління NORAD використовує мережу супутників, наземні радіолокаційні станції (РЛС) (25 одиниць), оптичні наземні комплекси (5 одиниць), а також радары на літаках. США веде єдиний в світі відкритий каталог КО – Інтернет-ресурс Spase-Track. **СККП Росії** – це особлива стратегічна система, основне завдання якої є спостереження за ШСЗ та іншими КО на навколосемних орбітах. Ця система сьогодні входить до складу військ повітряно-космічної оборони Росії і веде Головний каталог космічних об'єктів. До складу СККП Росії входять РЛС: "Дніпро", "Дар'ял", "Волга", "Дунай-3У"; радіооптичні комплекси "Крона"; оптичні комплекси: "Сажень-С", "Сажень-Т", "Вікно". У 2004–2007 роках було завершено створення міжнародної мережі оптичних телескопів "ПУЛКОН", розміщення яких перекриває всі довготи навколо земної кулі. До складу мережі входять 26 обсерваторій і спостережних пунктів, які розміщені в 10-ти країнах світу. **СККП ЄС** ґрунтується на функціонуванні Супутникового центру Європейського Союзу. Власні дослідження Європейська космічна агенція (ЄКА) проводить з використанням: однометрового телескопа ZIMLAT обсерваторії в Циммервальді Швейцарія; французького космічного радара GRAVES (франц. Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale); німецького радара TIRA, що належить Науково-дослідному інституту прикладних досліджень у Вачбергу. GRAVES є радаром бістатичної системи, яка одержує за допомогою доплерівського зсуву інформацію про орбітальні параметри виявлених супутників. **В Україні** контроль НЗКП проводиться СКАКО, яка функціонує в межах Національної космічної програми України, а також мережею УМОС і окремими обсерваторіями. Для функціонування цих систем використовуються оптичні і оптико-електронні телескопи.

Також у першому розділі проведено аналіз оптичних систем, що використовуються для спостережень метеорів. Вони поділяються на три типи: відеосистеми з широким полем зору ($>40^\circ$), проникна здатність $(5-7)^m$; стандартні відеосистеми (поле зору $10^\circ-40^\circ$), проникна здатність $(7-9)^m$, телескопічні відеосистеми (поле зору $<10^\circ$), проникна здатність краща ніж 9^m . **В США та Канаді** сучасні болідні мережі будуються на базі телевізійних технологій. У 2000-х роках Університетом Західного Онтаріо створена мережа станцій спостереження SOMN (Southern Ontario Meteor Network),

частиною якої є проект ASGARD (All Sky and Guided Automatic Realtime Detection). В теперішній час у США розгорнуто мережу для моніторингу всього неба CAMS (Cameras for All-sky Meteor Surveillance). Основна мета: реєстрація болідів, а також виявлення та підтвердження малих метеорних потоків. **В Європі** з 1959 р. працює Європейська болідна мережа (анг. European Fireball Network), і зараз мережа складається з 34 станцій-камер типу «риб'яче око» (Opton Distagon, $f=30$ мм, $f/3.5$), розташованих у Чехії (Ondrejov Observatory), Словаччині, Німеччині (German Aerospace Research Establishment), Австрії, Швейцарії та країнах Бенілюксу. Іншою великою європейською мережею є Video Meteor Network, аматорська організація, основне джерело даних телевізійних спостережень метеорів для International Meteor Organization. На сьогодні у мережі Video Meteor Network функціонує 81 камера, 46 спостерігачів у 15 країнах Європи. **В Японії** з 1989 р. функціонує Токійська метеорна мережа, в якій використовуються фотографічні установки з об'єктивами з $F=85-100$ мм, похибка за швидкістю складає 2–3%, за положенням $\pm 10-20''$. До сьогоднішнього дня в Японії функціонує аматорська фотографічна болідна мережа з використанням об'єктивів з фокусом ~ 35 мм. У 2004 р. почала працювати телевізійна метеорна мережа, робота якої базується на програмному забезпеченні детектування, обробки та розрахунку елементів орбіт UFO Tool Suite, розробленому SonotaCo. До 2008 р. кількість станцій досягла 31, а кількість камер більше 130. В основному використовувалися короткофокусні (3.8–12 мм) об'єктиви зі світлосилою $f/0.8$. **У СРСР** найбільші центри метеорної астрономії були зосереджені в Душанбе (Інститут астрофізики Академії наук Республіки Таджикистан) та Одесі (Астрономічна обсерваторія Одеського університету). У 1957–1963 роках на базі цих обсерваторій проводилися базисні, фотографічні спостереження яскравих метеорів (яскравіше $+1^m$). Використовувалися об'єктиви $f=250$ мм, $f/2.5$, фотоплівка шириною 19 см (полем зору $40^\circ \times 50^\circ$), експозиція 30–60 хв., відстань між станціями складала від 20 до 40 км.

У першому розділі охарактеризовано радіотехнічні системи для контролю ТК ГСС, які розроблено в ЄС та Китаї.

Розділ 2. Особливості методів дослідження навколоземного космічного простору. Особливістю спостережень КО в НЗКП є наявність в їх русі істотної швидкості і непаралельності відносно опорних зір. Для вирішення задачі визначення координат КО, застосовуються різні методи спостережень, які забезпечують координатну прив'язку КО до системи координат опорних зір. Всі методи, які використовуються, спрямовані на забезпечення зображення як КО, так і опорних зір у вигляді точки. З кінця 20-го сторіччя приймачами, що переважно використовуються у

спостереженнях КО, стали ПЗЗ-матриці різного типу реалізації матричних структур. У зв'язку з цим всі методичні рішення процесу спостережень були спрямовані на використання можливостей ПЗЗ-камер.

Спостереження КО в НЗКП повнокадровими ПЗЗ-камерами. Найбільш простою архітектурою відрізняються односекційні або повнокадрові приймачі. У них паралельний масив складається з однієї фоточутливої секції, що слугує як для накопичення фотогенерованого заряду, так і для паралельного перенесення заряду, і горизонтального зчитувального регістра з вихідним пристроєм (у деяких конструкціях є кілька вихідних пристроїв). У односекційних приладах процеси накопичення заряду і зчитування заряду розділені в часі, тому для запобігання змазування зображення при зчитуванні необхідно переривати світловий потік, використовуючи затвор.

Архітектура повнокадрових ПЗЗ-матриць дозволяє реалізувати властивий тільки для них режим формування зображення – синхронного переносу заряду (СПЗ). У цьому режимі рухоме по матриці зображення формується в процесі синхронного переносу заряду, тоді як на нерухомій ПЗЗ-матриці, що працює в кадровому режимі, рухоме зображення «розмазується» (рис. 1).

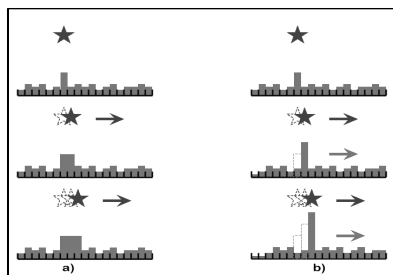


Рис. 1. Формування зображення при різних режимах роботи ПЗЗ-матриці:

а) кадровий, б) СПЗ.

У 2000 році автором, спільно з колегами, був запропонований КМС з використанням кадрового режиму та режиму СПЗ роботи ПЗЗ-камери для спостережень КО в НЗКП. Суть КМС полягає в тому, щоб рознести в часі спостереження опорних зір і КО, а також використовувати для їх спостережень найбільш оптимальний режим роботи ПЗЗ-камери, що дозволяє отримати точкове зображення всіх об'єктів спостережень.

При використанні КМС на нерухомому телескопі процес спостереження має наступну послідовність (рис. 2): на першому етапі проводиться спостереження опорних зір у режимі СПЗ зі швидкістю добового руху залежно від схилення, при цьому регістр ПЗЗ-матриці встановлюється перпендикулярно до напрямку руху зір; на другому етапі за допомогою поворотної платформи ПЗЗ-матриця повертається так, щоб регістр був перпендикулярний напрямку руху КО, і спостереження

проводяться в режимі СПЗ з попередньо обчисленою швидкістю руху КО; на третьому етапі проводяться спостереження тотожні першому.

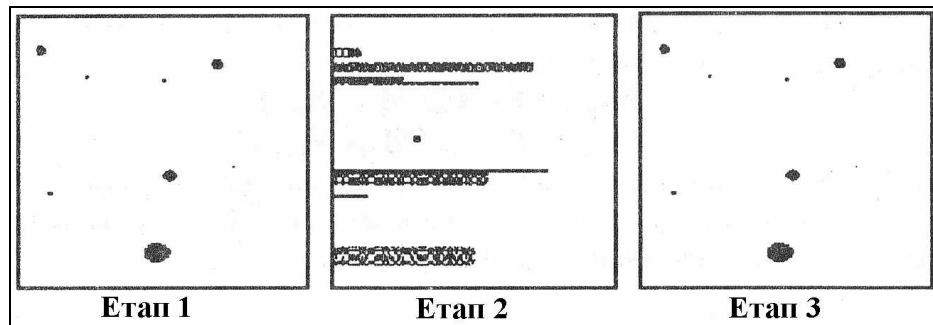


Рис. 2. Зображення зір і КО при реалізації КМС.

При спостереженні КО на низьких орбітах по дузі, яка дорівнює кутовому розміру матриці, його швидкість може значно змінитися, що призводить до нелінійного спотворення одержуваного зображення. Для усунення такого недоліку використовується спосіб вкороченого синхронного переносу заряду (ВСПЗ), що полягає в комбінуванні процесів синхронного переносу заряду і швидкого читання. При використанні способу ВСПЗ ПЗЗ-камера працює в режимі СПЗ протягом заданого часу експозиції. Після закінчення часу експозиції відбувається закриття затвора і швидке читання всього зображення з матриці. При використанні способу ВСПЗ можна змінювати час експозиції від 0 до часу проходження об'єкта через всю матрицю. У результаті використання способу ВСПЗ формується кадр з шириною, яка більше ширини ПЗЗ-матриці на кількість рядків у режимі СПЗ (рис. 3.).

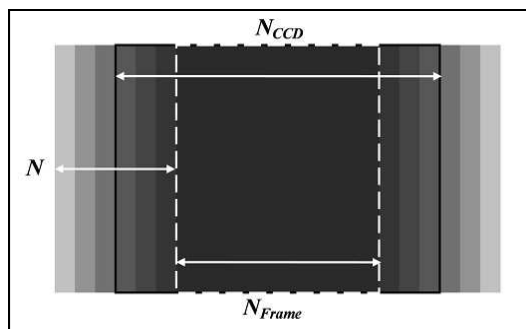


Рис. 3. Формування ПЗЗ-кадру з використанням способу ВСПЗ.

Таким чином, при використанні різних режимів роботи і повороту повнокадрової ПЗЗ-матриці щодо добового руху зір є можливість спостерігати КО будь-якої яскравості, які рухаються з різною швидкістю і в довільному напрямку.

При використанні телевізійних ПЗЗ-камер в астрономії застосовуються різні режими накопичення кадрів: пряме накопичення телевізійних кадрів, накопичення з вирівнюванням за зорями, накопичення

кадрів зі зміщенням за швидкістю об'єкта. При спостереженні об'єктів, що мають відому видиму швидкість відносно зір (астероїди, комети), вирівнювання кадрів можна використовувати не для поєднання зір, а для поєднання зображень рухомого об'єкта. Для цього до зміщення кожного кадру за прямим піднесенням, розрахованому за кількома яскравими зорями, додається зсув, розрахований за ефемеридною швидкістю об'єкта по схиленню. Підсумовування кадрів виконується на момент центрального кадру серії (рис. 4). Такий метод називається МНКЗ і дозволяє отримувати невитягнуті зображення астероїдів з експозицією в десятки секунд.

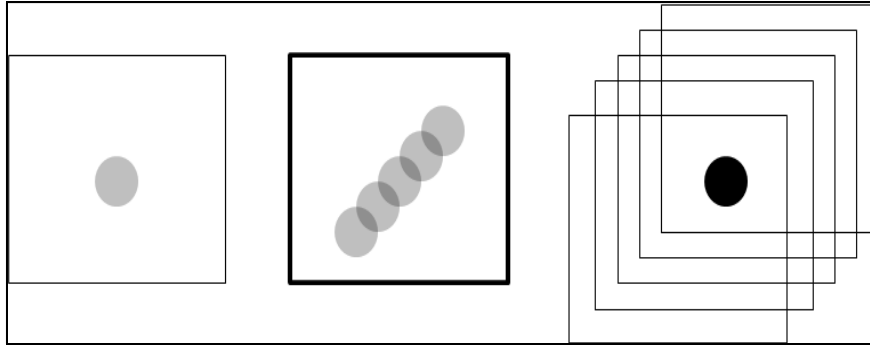


Рис. 4. Режими накопичення кадрів:

а) один кадр; б) пряме накопичення; в) накопичення зі зміщенням.

В НДІ МАО для моніторингу КО на навколосемних орбітах розроблено варіант МНКЗ для спостережень з використанням телевізійних камер на нерухомому телескопі. Цей метод особливо ефективний для формування зображення КО на низьких навколосемних орбітах. Оскільки під час формування відеопотоку телескоп залишається нерухомим, немає необхідності розрахунку величини додаткового вирівнювання кадрів за зорями. Це робить можливим реалізацію МНКЗ для телевізійних камер на нерухомому телескопі в реальному часі. Запропонований метод також застосовується і для отримання зображень зір. Накопичення серії кадрів здійснюється з паралельним зміщенням зображення кожного i -го кадру уздовж осей X , Y на відстань x_i , y_i . У відмінності від прямого накопичення кадрів, при накопиченні зі зміщенням мають значення моменти часу кожного кадру t_1, t_2, \dots, t_N і момент часу t , на який здійснюється накопичення. Момент t обирається як середній момент серії кадрів. Зміщення i -го кадру серії x_i, y_i розраховуються як відстань, яку проходить об'єкт за час між моментом даного кадру і моментом, на який здійснюється накопичення t . Інтенсивності пікселів зміщеного зображення $I'_{x',y'}$ розраховуються за інтенсивностями пікселів вихідного зображення $I_{x,y}$, зміщених на x, y з урахуванням також і дробової частини. Зміщення кадрів призводить до нерівномірної інтенсивності фону по периметру накопиченого кадру, що проілюстровано на рис. 5.

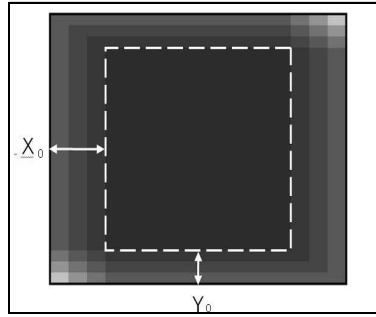


Рис. 5. Нерівномірність фону на ТВ-кадрах.

З 2011 року в НДІ МАО проводяться спостереження метеорів з використанням телевізійних камер. Спостереження проводяться з використанням МНКС для опорних зір. Для виявлення метеорних явищ використовується метод автоматичного детектування. Цей метод полягає у виділенні пікселів зображення, відношення сигнал/шум яких перевищує порогове значення для цих самих пікселів на попередніх кадрах. Крім відношення сигнал/шум, аналізується також швидкість об'єкта та його напрямок руху (рис. 6).



Рис. 6. Виділення треку метеора на ТВ-кадрах.

Запропонований автором у співпраці з колегами підхід до вирішення завдання визначення положення ТК ГСС ґрунтується на використанні сигналів цифрового супутникового телебачення. Для визначення положення ТК ГСС використовується безпосередньо корисне навантаження транспортного потоку DVB-S, за результатами фіксації якого визначають різницю нахилених віддалей до ТК ГСС з пунктів спостереження. У цьому відношенні запропонований підхід еквівалентний вживаному в радіоінтерферометрії, при якому також визначається різниця нахилених віддалей до джерела радіосигналу.

При обчисленні кореляційної функції вибірка, отримана одним з приймачів, використовується повністю (перша вибірка), а вибірка, отримана другим приймачем, використовується частково, лише середня частина заданої довжини, зміщена на час $\tau_2 \geq 0$ від її початку (друга вибірка, або вибірка корелятора). Обсяг першої вибірки фіксований і дорівнює 10240 відліків і не залежить від заданої шкали приладу, що визначає частоту

дискретизації. Обсяг другої вибірки – завжди менше ніж 10240 відліків. Нехай τ_1 – часовий зсув максимуму кореляційної функції, що відраховується від початку першої вибірки. Тоді, враховуючи синхронність записів вибірок двома приймачами, різниця віддалей до ТК ГСС буде пропорційна різниці $(\tau_1 - \tau_2) \times c$. Для уточнення положення максимуму і відповідно для збільшення точності визначення τ_1 використовується перетворення Гільберта кореляційної функції.

Розділ 3. Розробка та створення оптичних та радіо засобів для спостережень і досліджень КО в навколосемному космічному просторі. В розділі подана інформація про створення та модернізацію телескопів, які використовуються для контролю НЗКП з КМС.

З 2004 до 2013 рр. під керівництвом автора в НДІ МАО було розроблено та введено в експлуатацію 11 оптичних телескопів та радіокомплекс для дослідження об'єктів НЗКП, а саме: ШАК, МОБІТЕЛ (який включає телескоп КТ-50, ТВТ, телескоп Мезон), АФУ-75, МТ (три базисні пари), радіоінтерферометричний комплекс визначення координат ТК ГСС у системі координат WGS84.

Телескоп ШАК (рис. 7) виготовлено в 2006 р. на базі телескопа-рефрактора з паралактичним монтуванням.

До складу ШАК входять:

1. Колона монтування,
2. Полярна вісь (вісь прямого піднесення),
3. Вісь схилення,
4. Дзеркальний об'єктив,
5. Об'єктиви телевізійного каналу,
6. Автоматичні приводи,
7. ПЗЗ-камери.



Рис. 7. Телескоп ШАК.

Телескоп обладнано дзеркальним об'єктивом системи Максудова ($D=300$ мм, $F=1500$ мм), поворотною платформою, механізмом юстування і повнокадровою ПЗЗ-камерою Alta U9000. Кутовий розмір поля дорівнює $83' \times 83'$, гранична зоряна величина – 17^m . Зі сторони противаги встановлено телевізійний канал, який складається із чотирьох фотооб'єктивів ($D=47$ мм, $F=85$ мм), які встановлено в одній площині на поворотному пристрої та обладнано високочутливими ПЗЗ-камерами WatecLCL 902H. Кутовий розмір поля одного фотооб'єктива $4.3^\circ \times 3.2^\circ$, гранична зоряна величина – 12^m . Телескоп ШАК встановлений в круглій башті-павільйоні на окремому фундаменті. Для збільшення кута огляду телескопа павільйон має плоский чотирикутний дах, який відкривається автоматично.

Телескоп МОБІТЕЛ виготовлено в 2010 році. Він є астрономічним засобом з можливістю транспортування і призначений для високоточних

вимірювань кутових координат природних і штучних КО. Основними перевагами мобільного оптичного астрономічного засобу є:

- економічна доцільність, обумовлена відсутністю капітального будівництва, що істотно знижує вартість телескопа;
- технологічна доцільність – комплекс дозволяє одночасно проводити спостереження різного роду КО з використанням декількох телескопів, встановлених на одній платформі;
- астрономічна доцільність – можливість проведення астрономічних спостережень у сприятливих астрокліматичних і метеорологічних умовах у заздалегідь обраних географічних пунктах.

До складу комплексу телескопа МОБІТЕЛ (рис. 8) входять: платформа з павільйоном-укриттям; телескопи КТ-50 (модернізований), Мезон (виготовлений), ТВТ (виготовлений); система визначення місцезнаходження та єдиного часу; система незалежного енергозабезпечення.

Транспортна платформа (ТП) в робочому положенні є опорою для монтувань телескопів. На великі відстані автомобільними дорогами перевезення ТП здійснюється на автомобільному причепі. На невеликі відстані пересіченою місцевістю перевезення ТП виконується з використанням колісних пар платформи.

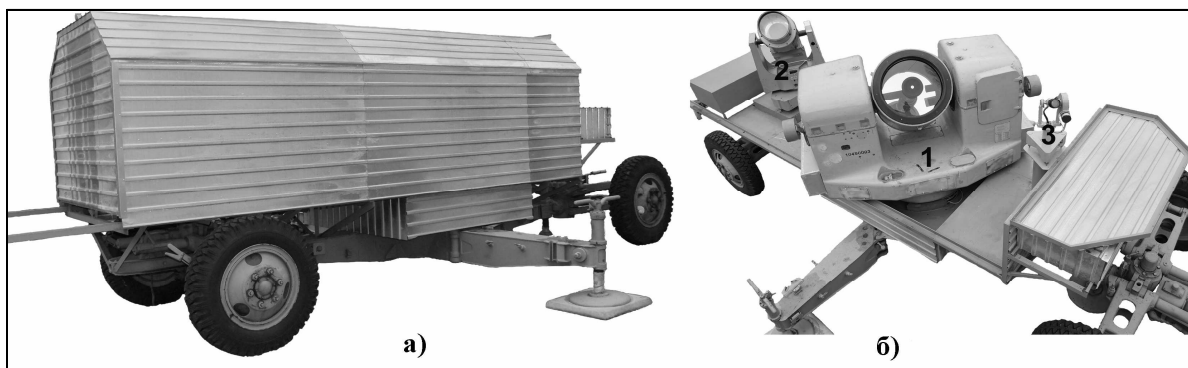


Рис. 8. Зовнішній вигляд комплексу телескопів МОБІТЕЛ
а) укриття телескопа, б) платформа з телескопами.

Для переведення телескопа з транспортного положення в положення для спостережень і назад, обидві ходові осі ТП обладнані спеціальним гідравлічним пристроєм. Конструкція ТП забезпечує високоточне горизонтування телескопів у польових умовах за допомогою гвинтових домкратів. Для захисту комплексу МОБІТЕЛ від атмосферних опадів виготовлено павільйон-укриття. Конструкція укриття передбачає температурну ізоляцію і охоронну сигналізацію. Технічні характеристики об'єктів телескопів комплексу МОБІТЕЛ приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики комплексу МОБІТЕЛ

№ з/п	Характеристики	КТ-50	Мезон	ТВТ
1	Фокусна відстань [мм]	3000	800	133
2	Діаметр об'єктива [мм]	500	230	47
3	Відносний отвір	1:6	1:3.5	1:2.8
4	Коефіцієнт світлопропускання [%]	44	60	80
5	Межі спектральної області [мкм]	0.4 – 1.0	0.4 – 1.0	0.4 – 1.0
6	Вага [кг]	350	43	0.6

Астрономічні характеристики телескопів комплексу МОБІТЕЛ приведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Астрономічні характеристики комплексу МОБІТЕЛ

№ з/п	Характеристики	КТ-50	Мезон	ТВТ
1	ПЗЗ-камера	Alta U9000	Alta U9000	Watec LCL 902H
2	Розмір поля зору [°]	0.8×0.8	2.6×2.6	2.8×2.8
3	Проникна здатність [m]	18	14	11
4	Режим спостережень	КМС	КМС	МНКЗ
5	Об'єкти, які спостерігаються	АЗЗ, ПНА ШСЗ, КС	ШСЗ, КС	ШСЗ

Телескоп АФУ-75 введено в дію у 2010 році після проведення повної модернізації як оптико-механічних, так і електронних вузлів. Телескоп обладнаний дзеркально-лінзовим об'єктивом «Сатурн» ($D=280$ мм, $F=750$ мм), який відноситься до катадіоптричних телескопів, в якому лінзові елементи за розмірами зрівняні з головним дзеркалом і призначені для корекції зображення. Телескоп оснащено ПЗЗ-камерою Alta U9000 і поворотною платформою. Кутовий розмір поля дорівнює $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, гранична зоряна величина – 14^m .

Телескоп АФУ-75 встановлений в окремому павільйоні типу «черепашка» (рис. 9). Павільйон має електромеханічний вузол відкривання/закривання стулок даху. Стулки даху мають теплоізоляційний шар, що зменшує денний нагрів всередині павільйону.



Рис. 9. Телескоп АФУ-75.

Система наведення телескопів ШАК, КТ-50, АФУ-75, Мезон та ТВТ містить крокові двигуни з блоком живлення і управління та абсолютні датчики кута повороту. Похибка наведення за заданими координатами становить 0.05° . Зона огляду телескопа за часовим кутом становить 180° (від -90° до $+90^\circ$ від меридіана), по схиленню від -25° до 90° . Прив'язка спостережень до шкали точного часу здійснюється за сигналом GPS-приймача Trambler Resolution T. Управління процесом спостереження на телескопі здійснюється розподіленим програмним комплексом.

МТ включає в себе два комплекси, встановлені на базі 12 км, які складаються з трьох статичних телескопів на легкому монтуванні, яке забезпечує ручне наведення телескопів по азимуту і куту місця (рис. 10). Кожен комплекс обладнано двома об'єктивами Canon-85mm (D=47 мм, F=85 мм) і одним об'єктивом Ломо-P0501 (D=50 мм, F=100 мм). Всі телескопи оснащені ТВ ПЗЗ-камерами Watec LCL902H і відповідно мають поле зору $3.2^\circ \times 4.2^\circ$ та $2.7^\circ \times 3.6^\circ$.



а)



б)

Рис. 10. Метеорний телескоп:

а) телескоп на території НДІ МАО, б) базисний телескоп (база 12 км).

Конструктивно один МТ складається з об'єктива і ПЗЗ-камери, закріплених з двох сторін циліндричного тубуса. Тубус встановлений в металевому корпусі (капсулі) діаметром 98 мм, довжиною 300 мм. У передній частині корпусу на ущільнювачах встановлено прозоре скло, яке запобігає попаданню опадів і пилу всередину корпусу. Також у передній частині корпусу встановлено пластмасову бленду.

Телескопи ШАК (об'єктив системи Максудова), КТ-50, Мезон та АФУ-75 обладнані сучасними ПЗЗ-камерами Argoee Alta U9000X фірми «Argoee imaging systems». Повнокадрова ПЗЗ-камера Alta U9000X є високочутливим повнокадровим матричним датчиком великого формату. У матриці використаний режим анти-блюмінга. Розмір матриці 3056×3056 , розмір пікселя 12×12 мкм, розмір світлочутливої площадки матриці 36.7×36.7 мм,

діагональ зображення 51.9 мм, потенційна яма 110,000 е, динамічний діапазон 84 дБ, інтерфейс PC USB 2.0. ПЗЗ-камери Alta U9000X встановлені на поворотних платформах телескопів ШАК, КТ-50, Мезон та АФУ-75. Поворотна платформа забезпечує встановлення камери в напрямку руху КО для використання синхронного переносу заряду. Телескопи ШАК (ТВ канал), ТВТ і МТ обладнані півднійомовими телевізійними ПЗЗ-камерами Watec LCL902H з чутливістю в 0.0001 лк.

Система програмного управління (СПУ) телескопів ШАК, МОБІТЕЛ, АФУ-75 та МТ розроблена в НДІ МАО і призначена для автоматизованої підготовки і проведення сеансів астрономічних спостережень КО, а також обробки отриманих результатів після спостережень. Робота СПУ здійснюється з використанням спеціального програмного забезпечення, що функціонує в операційній системі Windows. Обчислювальний керуючий комплекс складається з сервера, на якому встановлено програму управління автоматичним процесом спостережень, і керуючих комп'ютерів, встановлених на телескопах. Систему визначення місця розташування і служби єдиного часу розроблено в НДІ МАО на основі GPS-модуля Resolution T.

Радіоінтеферометрична мережа, для визначення орбітального положення ТК ГСС, складається з чотирьох ідентичних станцій синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення. Станції встановлені в містах Київ, Миколаїв, Мукачеве, Харків (рис. 11). Пунктом обчислення орбітальних параметрів є НДІ МАО.

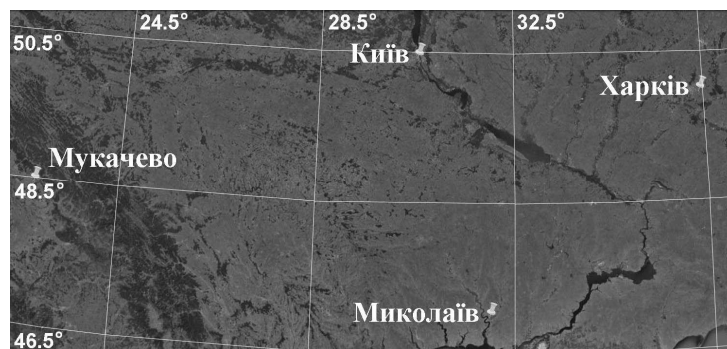


Рис. 11. Розміщення станцій мережі спостереження ТК ГСС.

До складу кожної станції розробленого в НДІ МАО радіотехнічного комплексу входять наступні складові: 1) стандартна антенно-фідерна система прийому сигналів супутникового телебачення; 2) приймач сигналів цифрового супутникового телебачення (SkyStar1 або SkyStar2), доопрацьований в частині виведення синфазного (In) і квадратурного сигналів (Qu) до цифрової обробки їх мікропроцесором приймача; 3) одночастотний GPS-приймач Thunderbolt E; 4) цифровий USB-осцилограф DSO5200A із смугою пропускання 200 МГц і 9 бітним аналого-цифровим

перетворювачем; 5) персональний комп'ютер з портами USB і RS-232 під управлінням операційної системи Windows.

Блок-схему станції представлено на рис. 12. Відповідно до блок-схеми сигнали з виходу квадратурного детектора-приймача подаються на два канали цифрового USB-осцилографа. Запис у внутрішню пам'ять осцилографа реалізацій у часі цих сигналів (IQ) виконується в момент приходу сигналу PPS (pulse-per-second) від GPS-приймача Thunderbolt E.

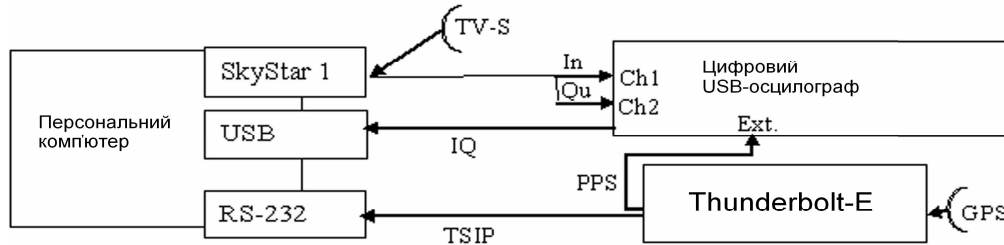


Рис. 12. Блок-схема станції.

Зчитування даних IQ з внутрішньої пам'яті осцилографа проводиться через порт USB відразу після надходження від GPS-приймача пакета даних з інформацією про поточний час. Момент початку видачі цієї інформації в порт RS-232 комп'ютера прив'язаний до моменту видачі сигналу PPS.

Розділ 4. Дослідження оптичних та радіо засобів спостережень, результати спостережень космічних об'єктів. Дослідження оптичних телескопів проводилось за наступними напрямками: визначення якості фокусування, вивчення аберацій об'єктива, врахування систематичних поправок приводів азимутних монтувань і поворотних платформ телескопів. Дослідження якості фокусування проводилось методом Кука і оцінювалось за мінімумом напівширини зображення зір (анг. FWHM). Об'єктивами телескопів, які використовувались у роботі для спостережень КО, є спеціалізовані астрономічні і фотографічні об'єктиви, в яких практично відсутні аберації типу: сферична, кома, астигматизм і кривизна поля. FWHM для об'єктивів представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Характеристики об'єктивів телескопів

№ з/п	Об'єктив (телескоп)	D/F (мм)	A	FWHM ["]
1	ЛЗО-50 (КТ-50)	500/3000	$f/6.0$	2.5-2.0
2	Максутов (САК)	300/1500	$f/5.0$	4.8-2.5
3	«Мезон»-1А (Мезон)	230/800	$f/3.5$	8-6
4	Сатурн (АФУ-75)	280/750	$f/2.7$	10-7
5	Таир-11А (ТВТ)	47/133	$f/2.8$	38-25
6	Ломо P0501 (МТ)	50/100	$f/2.0$	80-35
7	Canon 85mm (МТ)	47/85	$f/1.8$	65-25

Хроматизм положення та хроматизм збільшення на телескопах КТ-50, ШАК, Мезон, АФУ-75 максимально нейтралізований установкою скляного світлофільтра ОС-14 (4.5 мм). Спектральна характеристика світлофільтра ОС-14 в поєднанні зі спектральною характеристикою матриці КАФ-09000 формує фотометричну смугу близьку до R стандартної фотометричної системи Бесселя.

Для вибору моделі редукції спостережень проведено дослідження впливу моделі редукції на значення (O–C) опорних зір. Для цього на досліджуваному телескопі отримують 10–20 кадрів зоряних площадок. Далі програмою Astrometrica обчислюються екваторіальні координати зір і їх (O–C) відносно опорного каталогу із застосуванням лінійної, квадратичної та кубічної моделей редукції. З використанням результатів обчислень для кожного кадру будувалися тривимірні графіки розподілу (O–C) залежно від прямокутних координат у системі ПЗЗ-матриці. Зображення розбивається на клітинки 15×15 пікселів для камери U9000 і 16×16 пікселів для ТВ-камер. В кожній клітинці проводилось усереднення нев'язок. Середнє значення (O–C) використовується як поправка до координат об'єкта спостереження.

Дослідження приводів телескопів спрямоване на забезпечення максимально точної установки телескопа в точку спостереження. Обсяг досліджень містить визначення систематичних поправок, які додаються до розрахункових координат КО для забезпечення спостереження КО в визначеній частині поля телескопа. Систематичні поправки визначалися для приводу телескопа по азимуту, куту місця і приводу поворотної платформи.

Випробування апаратно-програмного комплексу станцій синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення проведено в умовах розташування станцій в одній точці («нульова» база) і використання одного і того ж сигналу PPS для синхронізації записів вибірок у внутрішню пам'ять осцилографів. Отримано внутрішню похибку комплексу з СКП=±7 нс, що для відношення сигнал/шум рівного 11 та частоти дискретизації 102.4 МГц є гранично можливими для апаратно-програмного комплексу станції. Похибка визначення нахиленої віддалі до ТК ГСС склала ±2.6 м, або ±8.7 нс.

Регулярні спостереження АЗЗ та ПНА на телескопі КТ-50 проводяться з 2008 року. За 2008–2014 рр. у НДІ МАО отримано 4053 положення 268 АЗЗ. За результатами спостережень ведеться каталог положень АЗЗ. Наповнення каталогу по роках представлено на рис. 13.

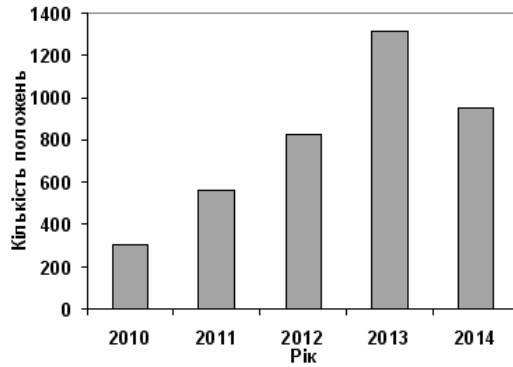


Рис. 13. Наповнення каталогу АЗЗ НДІ МАО по роках.

99% нев'язок спостережень НДІ МАО знаходяться в межах $\pm 1''$ (рис. 14) і рівномірно розподілені близько нуля, що говорить про відсутність систематичних похибок. Середня СКП спостережень у НДІ МАО склала $\pm 0.''25$ у порівнянні з $\pm 0.''75$ інших обсерваторій, які представлені на сайті NEODyS¹⁾.

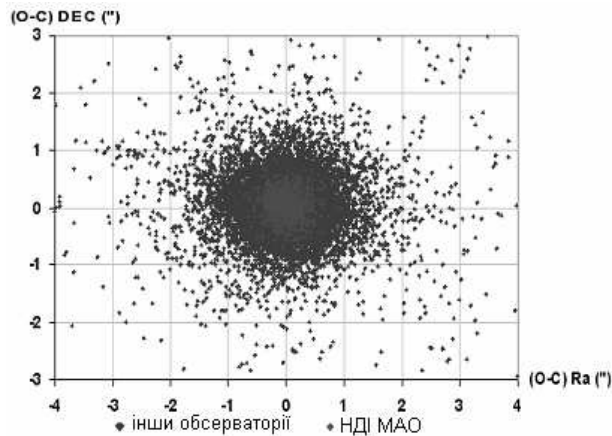


Рис. 14. Нев'язки спостережень АЗЗ.

За даними аналізу положень АЗЗ, представлених у Міжнародному центрі малих планет (МППЦ), НДІ МАО займає 12–13 місце в світі і перше в Україні за спостереженнями ПНА. Також у НДІ МАО за період 2012 – 2014 років проведено спостереження: 15-ти АЗЗ розміром до 140 м, які зближались з Землею на відстань менше 0.05 а.о., 8 АЗЗ на малих кутах сонячної елонгації (менше 90°), з них 3 при елонгації менше 45° . Через спостереження 4-х кандидатів у АЗЗ НДІ МАО включено до списку обсерваторій, які отримали подяку від міжнародного проекту Catalina Sky Survey.

Для проведення координатних спостережень КО на навколосемних орбітах було обрано декілька типів об'єктів (табл. 4) залежно від висоти орбіти (для ведення каталогу орбіт) або функціонального призначення (для оцінки можливості спостереження).

1) <http://newton.dm.unipi.it/neodys/>

Список типів КО, які спостерігаються

Тип КО	Висота орбіти (км)
КО на низьких орбітах, де впливає атмосфера	420 – 1400
КО на низьких орбітах, де не впливає атмосфера	1400 – 2500
Низькоорбітальні КО з кутовими відбивачами	440 – 1500
Навігаційні КО з кутовими відбивачами	~20000
Список СККП України	300 – 36000
Мініспутники ДЗЗ (RapidEye)	630
Мініспутники комунікаційні (Orbcomm)	660 – 790
Наносупутники, розміром 10x10x10 см (CubeSat)	450 – 830
ГСС	~36000
Фрагменти запуску ракети Дніпро з ШСЗ Січ-2	~700 км
ГСС списку проекту "Інтерферометр РТ-70"	2000 – 36000
Лазерно активний ГСС "ARTERMIS"	~36000
Високоеліптичний супутник Спектр-Р	600 – 340000

Статистика отриманих положень КО за результатами спостережень на телескопах НДІ МАО в 2011–2014 роках представлена в таблиці 5.

Таблиця 5

Статистика спостережень

Рік	Об'єкти	Проводки	Положення	Тривалість (хв.)	Ночей
2011	14	169	942	450	14
2012	254	1550	57550	5920	90
2013	292	2118	44863	6850	106
2014	235	3607	52303	15311	118

За результатами спостережень телескопів НДІ МАО, а також телескопів мережі УМОС, виконано оцінку внутрішньої і зовнішньої точності отриманих положень КО. Середні значення систематичних різниць (без врахування знаку) та СКП одного спостереження для різних телескопів і типів орбіти представлено в таблиці 6.

Результати спостережень КО мережею УМОС

Обсерваторія	Телескоп	Тип орбіти	(O-C) ["]	СКП ["]
НДІ МАО	КТ-50	LEO	1.2	0.6
НДІ МАО	ТВТ	LEO	2	2.5
НДІ МАО	АФУ-75	LEO	2	10
НДІ МАО	КТ-50	МЕО/GEO	0.7	0.3
НДІ МАО	АФУ-75	МЕО	2	1.0
НДІ АО ОНУ	КТ-50	LEO	0.5	0.5
АО ЛНУ	ЛД-2	LEO	3	4
ЛКД УжНУ	ТПЛ-1М	LEO	–	4.5
ДМЦ “Оріон”	ТПЛ-1М	LEO	–	2.5

Оцінка похибок ефемерид для низькоорбітального КО на інтервалі прогнозування 15 діб склала 0.2° вздовж орбіти і 0.03° впоперек орбіти, для геосинхронного КО на інтервалі прогнозування 140 діб склала 0.07° і 0.005° відповідно. Отримані похибки в 10 разів менше, ніж поля зору телескопів, на яких проводились спостереження. Поточні результати спостережень КО на навколосемних орбітах представлено на сайті УМОС¹⁾ (рис. 15).



Рис. 15. Інтерфейс сайту УМОС.

За результатами регулярних спостережень метеорів, за період 2012–2014 років, отримано 4135 реєстрацій метеорних явищ. Всі дані оброблені до екваторіальних координат у системі каталогу USNO-B1.0. Інтегральні характеристики яскравості зображень метеорів представлено на рис. 16 для об'єктивів Canon-85mm та Ломо-P0501 відповідно.

¹⁾ <http://umos.mao.kiev.ua/ukr/>

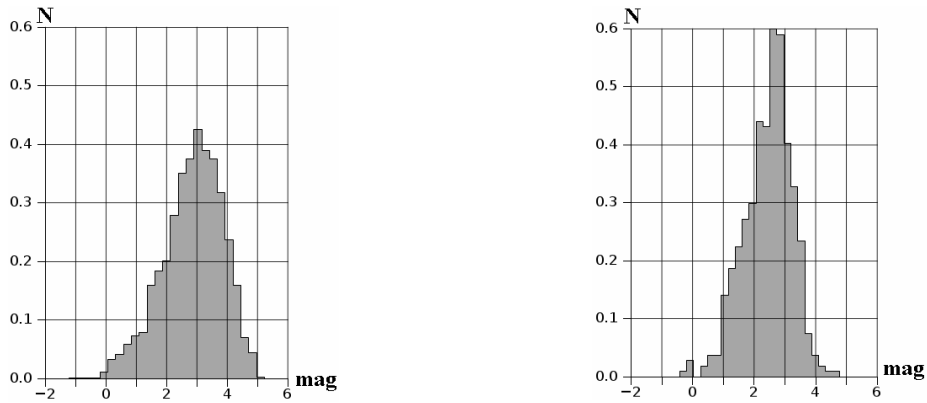


Рис. 16. Розподіл зображень метеорів за інтегральною зоряною величиною.

Щодобовий розподіл метеорних явищ, зареєстрованих в НДІ МАО, порівняно з даними Міжнародної метеорної організації. Коефіцієнт кореляції складає 0.3.

За даними спостережень 328 базисних метеорів розраховано екваторіальні координати радіантів способом Боліна. Розподіл радіантів небесною сферою представлено на рис. 17. СКП радіантів складала $\pm 0.^\circ 1$ за прямим піднесенням та $\pm 0.^\circ 3$ за схиленням.

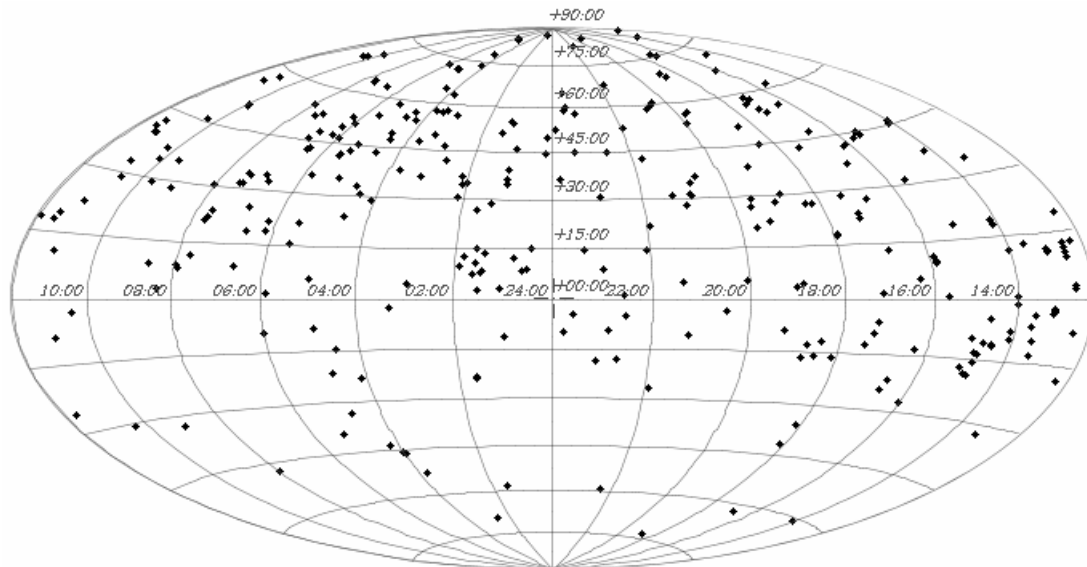


Рис. 17. Розподіл радіантів небесною сферою.

Більше 80% радіантів метеорних траєкторій мають похибку менше $0.^\circ 1$, що відповідає кращим світовим даним, які публікуються в журналі Міжнародної метеорної організації.

Визначення просторових координат X , Y , Z ТК ГСС та їх варіацій проводились за спостереженнями супутника Eutelsat 13В (точка стояння 13° СД). Добовий хід просторового положення супутника представлено на рис. 18.

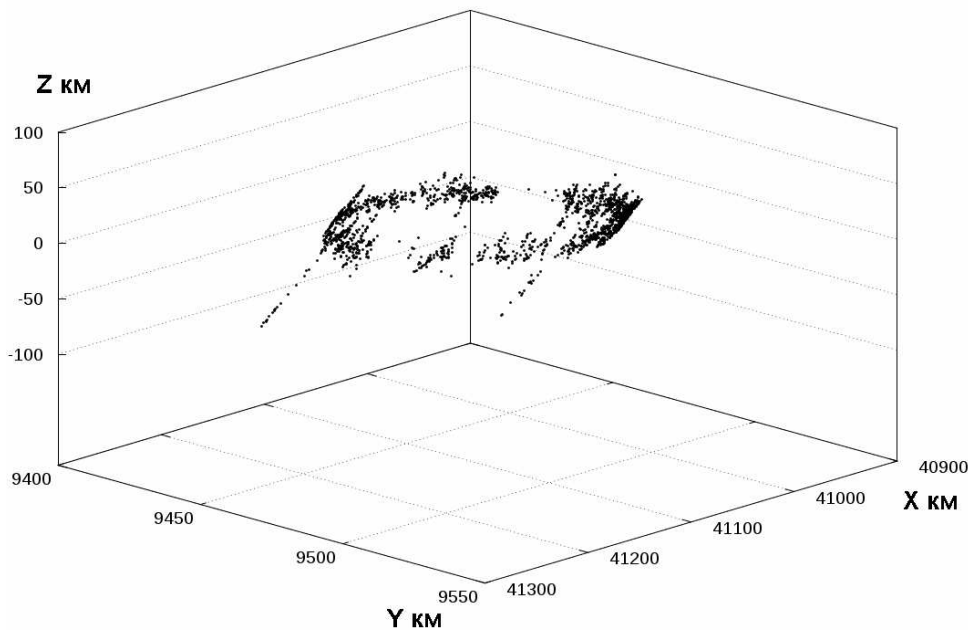


Рис. 18. Добовий хід просторового положення супутника Eutelsat 13В.

СКП визначення координат X, Y, Z , відповідно, дорівнює ± 3200 м, ± 640 м і ± 400 м.

ВИСНОВКИ

В дисертації підсумовуються результати роботи, яку автор проводив з метою дослідження НЗКП, з використанням нових оригінальних методів і технічних засобів, які реалізують такі методи. Загалом було розроблено два методи для проведення оптичних спостережень та впроваджено метод радіоінтерферометричних спостережень ТК ГСС. Розроблено та виготовлено шість оптичних телескопів та чотири радіотехнічні апаратно-програмні комплекси. Результати спостережень представлено на двох міжнародних Інтернет-ресурсах, та розроблено один всеукраїнський сайт (<http://umos.mao.kiev.ua/ukr/>).

Розроблений за участю автора комбінований метод спостережень КО з використанням повнокадрових та телевізійних ПЗЗ-камер впроваджено в практику контролю навколоземного космічного простору. Впровадження КМС значно розширило можливості спостережень КО, які мають значну швидкість відносно опорних зір. КМС реалізовано на шести автоматичних оптичних телескопах НДІ МАО оригінальної конструкції: ШАК, МОБІТЕЛ (у складі КТ-50, Мезон та ТВТ), АФУ-75, комплекс МТ для базисних спостережень. Також КМС впроваджено на чотирьох телескопах української мережі УМОС.

Проведено масові спостереження КО з використанням КМС. Спостереження АЗЗ та ПНА представлено на міжнародному Інтернет-

ресурсі Minor Planet Center. На телескопах ШАК та МОБІТЕЛ (КТ-50) одержано каталог 4042 положень АЗЗ та ПНА 13^m – 18.5^m , які спостерігались на віддалі 0.002–1.0 а.о. від Землі. Каталог отримано в системі ICRS, з похибкою спостережень $\pm(0.1-0.6)''$.

Використання комплексу автоматичних телескопів НДІ МАО та обсерваторій УМОС забезпечило функціонування спеціалізованого сайту УМОС. На сайті представлено орбітальні параметри 896 КО на низьких, 47 КО на середніх і 39 КО на геостаціонарних орбітах. Всього отримано спостережень супутників: 159467 – на низьких орбітах, СКП= $\pm(1-5)''$; 2103 – на середніх орбітах, СКП= $\pm(0.5-3)''$; 4422 – на геостаціонарних орбітах, СКП= $\pm(0.1-1)''$. Точність спостережень КО на геостаціонарних орбітах відповідає кращим світовим зразкам, а на низьких і середніх орбітах краща за світові дані для оптичних телескопів.

Проводяться регулярні спостереження метеорів з використанням оригінальної методики детектування метеорів у відеопотоці телевізійних ПЗЗ-камер. Спостереження проводяться на комплексі автоматичних МТ. Отримано 4135 однопунктних спостережень метеорів для ототожнення з метеорними потоками статистичним методом, а також спостереження 328 базисних метеорів для розрахунку високоточних радіантів метеорних потоків та елементів орбіти індивідуальних метеорів. СКП визначення радіантів склала $\pm 0.^\circ 1$ за прямим піднесенням та $\pm 0.^\circ 3$ за схиленням.

Для ТК ГСС проводиться безперервне визначення їх координат X, Y, Z в системі координат WGS84 методом радіоінтерферометрії. Для спостережень використовується мережа станцій синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення, рознесених по всій території України (Київ, Миколаїв, Мукачеве, Харків). Апаратно програмний комплекс станцій та метод кореляційної обробки сигналів супутникового телебачення розроблено в НДІ МАО. Для координат X, Y, Z СКП дорівнює ± 3200 м, ± 640 м і ± 400 м відповідно.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових виданнях, що входять до наукометричних баз даних, та в наукових фахових виданнях

1. Vishnevsky G.I. Scientific and technical collaboration between Russian and Ukrainian researchers and manufacturers on the development of astronomical instruments equipped with advanced detection services /Vishnevsky G.I., Galyatkin I.A., Dalinenko I.N., Vydrevich M.G., Zhuk A.A., Ibyaminova A.F., Kossov V.G., Levko G.V., Nesterov V.K., Rivkind V.L., Rogalev Yu.N., Smirnov A.V., Gumerov R.I., Pinigin G.I., **Shulga A.V.**,

- Kovalchyk A.V., Protsyuk Yu.I., Malevinsky S.V., Abrosimov V.M., Mironenko V.N., Savchenko V.V., Ivanschenko Yu.N., Andruk V.M.// *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – 2003. – V. 22, № 4–5. – P. 777–786.
2. Абросимов В.М. Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой /Абросимов В.М., Ковальчук А.Н., Малевинский С.В., Пинигин Г.И., Савченко В.В., **Шульга А.В.**/ *Космічна наука і технологія*. – 2004. – Т. 10, № 1. – С.79–84.
 3. Petrov G. M. About scientific schools in the Nikolaev Astronomical Observatory in the fields of positional astronomy and astronomical instrumentation /Petrov G. M., Pinigin G. I., **Shulga A.V.**// *Kinematics and Physics of Celestial Bodies, Suppl. Ser.* – 2005. –№ 5. – P.338–342.
 4. Bazyey O.A. The method for fast determination of geostationary Earth satellite orbit from angular coordinates measurements /Bazyey O.A., Sibiryakova E.S., **Shulga A.V.**// *Odessa Astronomical Publications*. – 2005. –V. 18. – P. 8–13.
 5. Козырев Е.С. Реализация комбинированного метода в НИИ НАО для наблюдений геосинхронных спутников /Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., **Шульга А.В.**// *Odessa Astronomical Publications*. – 2007. – V. 20, № 2. – P. 53–54.
 6. Саваневич В. Е. Спосіб виявлення рухомих об'єктів /Саваневич В. Е., Деденок В.П., **Шульга А.В.**// Патент України на винахід №80712. ДП «Український інститут промислової власності», 25.10.2007.
 7. Hudkova L. Current state and development of the minor planets research in Nikolaev Astronomical Observatory /Hudkova L., Ivantsov A., Pinigin G., **Shulga A.**// *Planetary and Space Science*. – 2008. –V. 56, № 14. – P. 1835–1838.
 8. 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.
 9. Федоров П.Н. Опорные системы координат в современной астрометрии /Федоров П.Н., Ахметов В.С., **Шульга А.В.**// *Космічна наука і технологія*. – 2010. – Т. 16, № 6. – С. 68–74.
 10. Козырев Е.С. Телевизионные наблюдения низкоорбитальных космических объектов 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. 71–76.
 11. Кара И.В. Каталог геоцентрических векторов состояния геосинхронных космических объектов НИИ НАО /Кара И.В., Козырев Е.С.,

- Сибирякова Е.С., **Шульга А.В.**// Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. – 2011. – Т.107, № 1. – С. 145–151.
12. Вавилова И.Б. Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Современное состояние и перспективы развития объединенного архива наблюдений /Вавилова И.Б., Пакуляк Л.К., Процюк Ю.И., Вирун Н.В., Шляпников А.А., Кашуба С., Пихун А.И., Андриевский С.М., Мажаев А.Э., Казанцева Л.В., **Шульга А.В.**, Золотухина А.В., Сергеева Т.П., Мирошниченко А.П., Андронов И.Л., Бреус В.В., Вирнина Н.А.// Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 74–91.
13. Kara I.V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects /Kara I.V., Kozuyrev Y.S., Sybiryakova Y.S., **Shulga O.V.**// Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory. – 2011. – V. 107. – P. 98–102.
14. 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.
15. 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.
16. Бушуев Ф.И. Определение дальности до телекоммуникационных геостационарных спутников с использованием сигналов спутникового телевидения /Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сливинский А.П., **Шульга А.В.**// Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т.17, №3. – С. 282–290.
17. Сибирякова Е.С. Результаты координатных наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, с использованием комбинированного метода наблюдений /Сибирякова Е.С., Козырев Е.С., **Шульга А.В.**// Известия Крымской Астрофизической Обсерватории – 2013.– Т. 109, № 1. – С. 103–108.
18. Куличенко Н.А. Телевизионные наблюдения метеоров в НИИ НАО /Куличенко Н.А., **Шульга А.В.**, Козырев Е.С., Сибирякова Е.С.// Вісник Астрономічної школи. – 2013. – Т.9, №1–2. – С. 107–110.
19. Вовк В.С. Первые результаты регулярных наблюдений низкоорбитальных космических объектов в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» /Вовк В.С., Козырев Е.С., Куличенко Н.А., Сибирякова Е.С., **Шульга А.В.**// Космічна наука і технологія. – 2013. –Т.19, № 6. – С. 53–59.
20. Nechaeva M. A experiment on radio location of objects in the near-Earth space

- with VLBI in 2012 /Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukov V., Bezrukov D., Dementjev A., Dugin N., Konovalenko A., Kulishenko V., Liu X., Nabatov A., Nesteruk V., Pupillo G., Reznichenko A., Salerno E., Shmeld I., **Shulga O.**, Sybiryakova Y., Tikhomirov Yu., Tkachenko A., Volvach A., Yang W.-J.// *Baltic Astronomy*. – 2013.– V. 22.– P. 35–41.
21. Sybiryakova Ye. S The results of positional observations of near Earth asteroids using the combined observation method /Sybiryakova Ye. S., Kozyryev Ye. S., **Shulga A.V.**// *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. – 2013. – V. 109, № 1. – P. 66–70.
22. Jin Wen-jing Collaboration between SHAO (China) and NAO (Ukraine) /Jin Wen-jing, Pinigin G., Tang Zheng-heng, **Shulga A.**// *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*. – 2013. – № 34. – P. 123–134.
23. Вовк В.С. Наблюдения АСЗ малых размеров и в условиях малой солнечной элонгации /Вовк В.С., Куличенко Н.А., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., **Шульга А.В.**// *Кинемат. и физ. небесных тел*. – 2015. – Т. 31, № 3. – С. 73–80.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

24. Ковальчук А.Н. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве /Ковальчук А.Н., Пинигин Г.И., **Шульга А.В.**// *Сборник трудов конференции «Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы»*. – Москва, 2000. – С. 361–371.
25. Kovalchuk A. Combined CCD observational Method of Geostationary Satellire, methodical and Technical Designs and Results /Kovalchuk A., **Shulga A.**, Martynov M.// *Proceedings of the International conference “Extention and Connection of Reference Frames using ground-based CCD Technique”*. – Nikolaev, 2001. – P.194–200.
26. 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.
27. Лаврухіна Р.В. Аналіз базисного методу визначення похилих дальностей до штучних супутників Землі /Лаврухіна Р.В., **Шульга О.В.**// *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць “Системні технології”*. – Дніпропетровськ, 2006. – № 5. – С. 89–94.
28. Деденок В.П. Первоначальное определение круговой орбиты космического объекта по данным нескольких сеансов оптических наблюдений /Деденок В.П., Ткаченко А.А., **Шульга А.В.**// *Збірник*

- наукових праць об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – Харків, 2006. – Т.1, № 3. – С. 175–184.
29. 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.
 30. 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.
 31. 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.**, Апуневич С.В., Билинский А.И., Благодыр 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.
 32. Kozyryev Y. Observation of NEOs Having High Apparent Rates with Mobitel Telescope /Kozyryev Y., Sybiryakova Y., **Shulga A.**// Gaia Follow-up Network for Solar System Objects Workshop held at IMCC – Paris Observatory 2010, November 29 – December 1. – P. 97–100.
 33. Козырев Е.С. Исследование объектов ближнего космоса /Козырев Е.С., Ковальчук А.Н., Сибирякова Е.С., **Шульга А.В.**// Николаевская астрономическая обсерватория 190 лет. Материалы международной научной конференции «Астрономические исследования: от ближнего космоса до Галактики». – Николаев, 2011. – С. 6–14.
 34. Пинигин Г.И. Развитие приборостроения в Николаевской обсерватории /Пинигин Г.И., **Шульга А.В.**// Николаевская астрономическая обсерватория 190 лет. Материалы международной научной конференции «Астрономические исследования: от ближнего космоса до Галактики». – Николаев, 2011. – С. 35–46.
 35. Jin W. The collaboration between ShAO and NAO /Jin W., Pinigin G., Tang Zh., **Shulga A.**// Николаевская астрономическая обсерватория 190 лет. Материалы международной научной конференции «Астрономические исследования: от ближнего космоса до Галактики». – Николаев, 2011 – С. 92 – 104.

36. Бушуев Ф.И. О службе времени НИИ НАО /Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сливинский А.П., **Шульга А.В.**// Николаевская астрономическая обсерватория 190 лет. Материалы международной научной конференции «Астрономические исследования: от ближнего космоса до Галактики». – Николаев, 2011. – С. 121 – 126.
37. Шульга А.В. О функционировании Украинской сети оптических станций исследования околоземного космического пространства /**Шульга А.В.**, Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Кошкин Н.И., Кара И. В., Благодыр Я.Т., Вовчик Е.Б., Епишев В.П., Кудак В.И., Рыхальский В.В., Лопаченко В.В., Кожухов А.М., Рыщенко С.В.// Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – 2011. – №6. – С. 77–82.
38. Shulga O. V. Estimation of current state of EgyptSat-1 satellite from optical observations with Ukrainian stations /Lopachenko V. V., **Shulga O. V.**, Koshkin N. I., Vovchuk E. B., Epishev V. P., Ryshchenko S. V.// Bulletin of Ukrainian Earth Orientation Parameters Laboratory. – 2011. – V. 6. – P. 45–52.
39. Шульга А.В. Функционирование Украинской сети оптических станций исследования околоземного космического пространства /**Шульга А.В.**, Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Кошкин Н.И., Кара И. В., Благодыр Я.Т., Вовчик Е.Б., Епишев В.П., Кудак В.И., Рыхальский В.В., Лопаченко В.В., Кожухов А.М., Рыщенко С.В., Мурга В.В., Кузьков В.П.// IV Международный специализированный симпозиум «Космос и глобальная безопасность человечества». Сборник докладов. – К.: «Спейс-Информ», 2013. – С. 101-106.
40. Козырев Е.С. Система центрального керування мережею оптичних телескопів /Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., **Шульга О.В.**// Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – 2013. – №8. – С. 71–74.
41. Шульга О.В. Звіт про роботу Української мережі оптичних станцій (УМОС) за 2013 рік /**Шульга О.В.**, Козырев Е.С.// Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – 2013. – №8. – С. 118–121.
42. Шульга О.В. Звіт про роботу станції “Миколаїв”(NIKL) у мережі УМОС за 2013 рік /**Шульга О.В.**, Козырев Е.С.// Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – 2013. – №8. – С. 122–123.

АНОТАЦІЯ

Шульга О. В. Моніторинг об'єктів навколоземного космічного простору наземними оптичними та радіо засобами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 – астрометрія і небесна механіка. – Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, 2015.

В дисертації йдеться про моніторинг навколоземного космічного простору з використанням оригінальних методів спостереження в оптичному і радіо діапазонах хвиль. Для оптичних спостережень розроблено комбінований метод спостережень, який використовується на чотирьох телескопах НДІ МАО. В радіодіапазоні реалізовано метод синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення для визначення координат телекомунікаційних геостаціонарних супутників (ТК ГСС) методом радіоінтерферометрії. Для контролю положення ТК ГСС організовано їх регулярні спостереження мережею станцій (Київ, Миколаїв, Мукачеве, Харків).

За результатами оптичних спостережень отримано:

- каталог 4042 положень 330 астероїдів, що зближаються з Землею ($13^m-18.5^m$), які спостерігались на віддалі (0.002–1.0) а.о. від Землі, з середньоквадратичною похибкою (СКП) $\pm(0.1-0.6)''$;

- каталог елементів орбіти 982 космічних об'єктів (КО) на навколоземних орбітах. СКП спостережень склала: $\pm(1-5)''$ для низькоорбітальних, $\pm(0.5-3)''$ для навігаційних, $\pm(0.1-1)''$ для геостаціонарних КО;

- 4135 спостережень метеорів для ототожнення з метеорними потоками. Для 328 базисних метеорів розраховано радіанти метеорних потоків. СКП координат радіанта склала $\pm 0.^\circ 1$ за прямим піднесенням та $\pm 0.^\circ 3$ за схиленням.

Проводяться регулярні спостережень ТК ГСС. Розраховуються їх координати X, Y, Z у координатній системі WGS84. СКП визначення координат X, Y, Z склала ± 3200 м, ± 640 м і ± 400 м відповідно.

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

ABSTRACT

Shulga A.V. Monitoring of near-Earth space objects with ground-based optical and radio facilities. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Sciences, specialty 01.03.01 – astrometry and celestial mechanics. – Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis refers to the study of near-Earth space using original methods of observation in the optical and radio bands of the electromagnetic spectrum. A combined method of observation was developed for optical observations. The method was implemented using four telescopes at the Research Institute of Mykolaiv Astronomical Observatory. A method for synchronized reception of pseudo-noise signals of digital TV satellites was developed to determine the coordinates of telecommunication geostationary satellites (TC GSS) by radio interferometry method. To control positions of the TC GSS, their regular observations are carried out using a network of stations (Kyiv, Mykolaiv, Mukachevo, Kharkiv).

As a result of optical observations, we obtained the following:

- catalogue of 4042 positions for 330 near-Earth asteroids (NEA) in the magnitude range of 13^m to 18.5^m was compiled. The NEA were observed at a distance range of 0.002 to 1.0 a.u. The standard deviations (SD) of positions are $\pm(0.1-0.6)''$;

- catalogue of 982 objects in Earth's orbit was compiled. The SD of positions are $\pm(1-5)''$ for objects in low Earth orbit, $\pm(0.5-3)''$ for objects in medium Earth orbit, $\pm(0.1-1)''$ for objects in geostationary Earth orbit;

- 4135 observations of meteors were carried out to identify meteor showers. Radiants of meteor showers for 328 meteors were calculated using basis method. The SD of radiant coordinates are $\pm 0.^\circ 1$ in right ascension and $\pm 0.^\circ 3$ in declination.

Regular observations of the TC GSS are carried out. X, Y, Z coordinates of satellites are calculated using WGS84 coordinate system. The SD of X, Y, Z coordinates are ± 3200 m, ± 640 m, ± 400 m, respectively.

Keywords: positional observations, space objects, methods of CCD observations, online catalogue of positions.

АННОТАЦИЯ

Шульга А.В. Мониторинг объектов околоземного космического пространства наземными оптическими и радио средствами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.01 – астрометрия и небесная механика. – Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, 2015.

В диссертации речь идет о мониторинге околоземного космического пространства с использованием оригинальных методов наблюдения в оптическом и радио диапазонах волн. Для оптических наблюдений разработан комбинированный метод наблюдений. Метод реализован для полнокадровых ПЗС-камер на четырех телескопах НИИ НАО и для телевизионных ПЗС-камер на трех телескопах НИИ НАО. Разработана и внедрена в практику регулярных наблюдений сеть станций синхронизированного приема псевдошумовых сигналов цифрового спутникового телевидения для определения координат телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) методом радиоинтерферометрии.

С помощью комбинированного метода наблюдений (КМН) реализуются разнесенные во времени наблюдения космических объектов (КО) и опорных звезд. Для полнокадровых ПЗС-камер суть КМН заключается в комбинировании различных режимов работы – кадрового и синхронного переноса заряда. Для телевизионных ПЗС-камер КМН реализован с применением метода накопления кадров со смещением в произвольном направлении и с предвычисленным шагом. КМН практически обеспечивает получение изображения КО и опорных звезд в форме точек при любых их взаимных скоростях и направлениях видимого движения.

Радиоинтерферометрический метод наблюдения ТК ГСС основан на определении разности моментов приема спутникового сигнала разнесенными станциями приема с привязкой к PPS-секунде GPS-сигнала. Расстояние между станциями составляет 1000 км по долготе и 400 км по широте. Ошибка привязки составляет ± 10 нс.

Проведены оптические наблюдения:

- астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), на телескопах с полнокадровыми ПЗС-камерами, результаты представлены на международном Интернет-ресурсе Minor Planet Center. Получен каталог 4042 положений 330 АСЗ (13^m – 18.5^m), которые наблюдались на расстоянии

(0.002–1.0) а.е. от Земли, со среднеквадратической погрешностью (СКП) $\pm(0.1–0.6)''$;

- космических объектов на околоземных орбитах, на телескопах с полнокадровыми и телевизионными ПЗС-камерами. Результаты представлены на Интернет-ресурсе Украинской сети оптических станций. Получен каталог элементов орбит 982 КО, из которых 896 на низких, 47 на средних и 39 на геостационарных орбитах. СКП наблюдений составила: $\pm(1–5)''$ для низкоорбитальных, $\pm(0.5–3)''$ для навигационных, $\pm(0.1–1)''$ для геостационарных КО;

- метеоров, комплексом автоматических метеорных телескопов с телевизионными ПЗС-камерами, которые расположены на базисе 12 км. Получено 4135 однопунктных наблюдений метеоров для отождествления с метеорными потоками статистическим методом, а также 328 базисных метеоров для расчета радиантов метеорных потоков. СКП координат радианта составила $\pm 0.^\circ 1$ по прямому восхождению и $\pm 0.^\circ 3$ по склонению.

Методом радиоинтерферометрии с использованием сети четырех станций, разнесенных по территории Украины (Киев, Николаев, Мукачево, Харьков), проводятся регулярные наблюдения ТК ГСС. Рассчитываются их координаты X , Y , Z в координатной системе WGS84. СКП определения координат X , Y , Z составила ± 3200 м, ± 640 м и ± 400 м соответственно.

Ключевые слова: позиционные наблюдения, космические объекты, методы ПЗС-наблюдений, Интернет-каталог положений.