

**Є.С. Сибірякова, О.В. Шульга, В.С. Вовк,
М.П. Калюжний, Ф.І. Бушуєв, М.О. Куліченко, М.І. Халолей, В.М. Чернозуб**

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», вул. Обсерваторна, 1, Миколаїв, 54030 Україна,
тел. + 38 (0512) 47-70-14, dir@mao.nikolaev.ua

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕЛЕСКОПІВ НДІ «МАО»



Розроблено спеціальні методи, засоби та програмне забезпечення для спостережень та обробки результатів спостережень космічних об'єктів. Основним методом, який використовується для спостережень штучних космічних об'єктів, є комбінований метод, який полягає в роздільному накопиченні зображень з опорними зірками та штучними об'єктами. Метод використовується для спостережень штучних об'єктів на всіх типах орбіт.

Ключові слова: штучні супутники, телескопи, комбінований метод спостережень, режим вкороченого синхронного переносу заряду.

Основною проблемою при спостереженні штучних космічних об'єктів (КО) в оптичному діапазоні є проблема різних швидкостей видимого руху опорних зірок та КО. Так, для спостережень геосинхронних об'єктів використовується метод добового супроводу телескопом. У результаті отримують зображення геосинхронних об'єктів у вигляді штриха на тлі точкових зображень зірок. Або якщо спостерігають на нерухомому в процесі спостережень телескопі, то отримують точкові зображення КО на тлі зображень зір у вигляді штрихів. Обидва методи потребують спеціалізованого програмного забезпечення для обробки витягнутих зображень. Для спостережень КО в науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ «МАО») розроблено комбінований метод спостережень, в основі якого для формування зображень КО та опорних зір використовується режим синхронного переносу заряду (*time delay and integration*) з різною

швидкістю переносу заряду. Такий підхід дає можливість отримувати точкові зображення як опорних зір, так і об'єкта, що вивчається.

Окрім того, якщо брати об'єкти на низьких та середніх орбітах, то існує ще проблема формування зображень швидкісних об'єктів. На цей час у світі активно проводяться дослідження з пошуку оптимального методу формування зображень низькоорбітальних КО, чия швидкість досягає 1,5 град/с. Так, на рис. 1 наведені зображення низькоорбітальних КО, отримані різними методами: *а)* зображення КО Gravity Probe B, отримане в Корейському департаменті астрономії та космічної фізики з використанням телескопа ($D=0,5$ м, $F=1,5$ м), оснащеного ПЗЗ-камерою та об'єктивом [1]; *б)* зображення КО SL-26 RB, отримане в Римському університеті з використанням телескопа ($D=0,25$ м, $F=0,075$ м), оснащеного ПЗЗ-камерою в режимі добового супроводу [2]; *в)* зображення КО Envisat, отримане в Німецькому інституті технічної фізики Аерокосмічної агенції з використанням телескопа ($D=0,43$ м, $F=2,94$ м) в режимі добового супроводу [3].

РОЗВИТОК ДОСЛІДЖЕНЬ НАВКОЛОЗЕМНОГО КОСМІЧНОГО ПРОСТРУ В НДІ «МАО»

У НДІ «МАО» розвиток досліджень навколоземного космічного простру розпочався в 2000 р. з розробки комбінованого методу спостережень (автори розробки методу — Шульга О.В., Ковальчук О.М та Пінігін Г.І.). Вперше дані спостережень геостационарних КО були отримані в 2001 р. на мультіканальному телескопі ($D = 0,160$ м, $F = 2,044$ м), неавтоматизоване монтування). Для обчислення координат КО у режимі переносу заряду отримували кадри із зображеннями опорних зір. Кадри із зображеннями КО отримували на нерухомому телескопі в режимі накопичення. Перші спостереження КО показали необхідність розробки спеціалізованих автоматизованих телескопів та спеціальних методів спостережень. Протягом 2001–2010 рр. в НДІ «МАО» було розроблено п'ять автоматизованих телескопів та два методи формування зображень КО. Крім того, було модернізовано комбінований метод спостережень. Основним принципом роботи комбінованого методу спостережень є розділення процесів формування зображень опорних зір та КО. Це дозволяє отримувати точкові зображення обох типів об'єктів в режимах та з експозиціями, які найбільш вигідні для досягнення високого рівня співвідношення сигнал/шум [4]. Для спостережень з використанням повнокадрових ПЗЗ-камер розроблено метод вкороченого переносу заряду [5] (приклад зображення наведений на рис. 2, б). Передумовами розробки методу стало перенасичення зображень КО та нерівномірність швидкості

низькоорбітальних КО, що призводило до розтягування зображень при використанні довгих експозицій. Для спостережень з використанням телевізійних ПЗЗ-камер був розроблений метод накопичення кадрів зі зсувом [6], який дозволяє в режимі реального часу підсумовувати кадри із зображенням КО зі зсувом, який відповідає швидкості його руху в полі зору телескопа (приклад зображення наведений на рис. 2, а). Для реалізації методів в НДІ «МАО» розроблено та виготовлено спеціалізовані телескопи, які дозволяють використовувати розроблені методи. Паралельно з розробкою комбінованого методу спостережень було розроблено модифіковану модель редукації, яка дозволила проводити астрометричну редукацію спостережень, отриманих комбінованим методом, з міжкадровою прив'язкою.

ТЕЛЕСКОПИ, РОЗРОБЛЕНІ В НДІ «МАО» ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ КО

Швидкісний автоматичний комплекс (ШАК) — телескоп — був розроблений і виготовлений в 2004 р. та задіяний для спостережень навколоземних об'єктів до 2011 р. До складу телескопа входили два об'єктиви: 1) $D = 0,3$ м, $F = 0,15$ м, $FOV = (1,38 \times 1,38)^\circ$ — для спостережень геосинхронних КО та 2) $D = 0,057$ м, $F = 0,085$ м, $FOV (3 \times 4)^\circ$ — для спостережень низькоорбітальних КО. Телескоп був встановлений на паралактичному монтуванні. Швидкість наведення — 3 град/с, похибка наведення по обох осях телескопа складала $0,1^\circ$. На телескопі проводилися спостереження штучних космічних об'єктів на геосинхронних та низьких орбітах, точність спостережень складала $\pm(0,26-0,91)''$



Рис. 1. Зображення низькоорбітальних КО отриманих різними методами

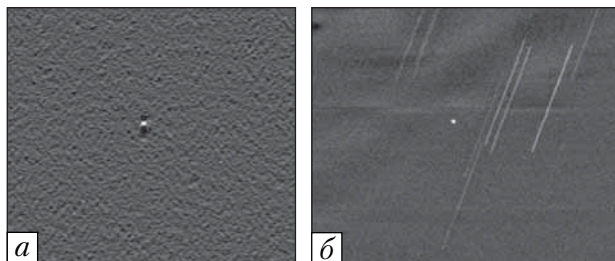


Рис. 2 Методи формування зображень, розроблені в НДІ «МАО»

для КО (12,5–14)^m та (1,4–5,6)["] для КО (3–10)^m відповідно.

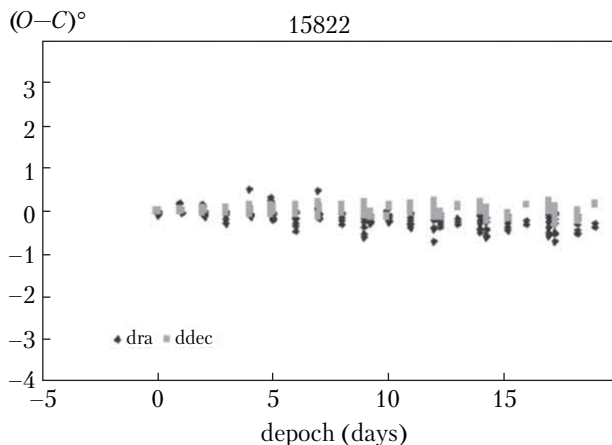
Комплекс телескопів МОБИТЕЛ, розроблений у 2010 р., включає в себе три телескопи на мобільній платформі [7]. Маневреність телескопа дозволяє використовувати його в кращих астрокліматичних умовах. На мобільній платформі встановлено три телескопи:

1) КТ-50 ($D = 0,5$ м, $F = 3,0$ м), оснащений повнокадровою ПЗЗ-камерою (3×3)к, з полем зору (0,7×0,7)[°] та проникною здатністю до 18,5^m (при експозиції 120 с); телескоп використовується для спостережень КО на всіх типах орбіт з точністю ± 0,5["];

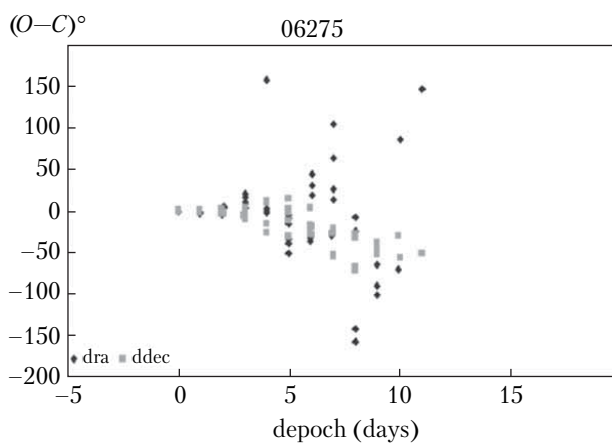
2) телевізійний телескоп ($D = 0,05$ м, $F = 0,14$ м), оснащений телевізійною ПЗЗ-камерою Watec 902h з полем зору (2,8×2,1)[°] та проникною здатністю до 11^m; телескоп використовується для спостережень низькоорбітальних КО з точністю ± 2,0["];

3) телескоп Мезон ($D = 0,23$ м, $F = 0,8$ м), оснащений повнокадровою ПЗЗ-камерою (3×3)к, з полем зору (2,7×2,7)[°] та проникною здатністю до 16^m (при експозиції 120 с); телескоп використовується для спостережень КО на всіх типах орбіт.

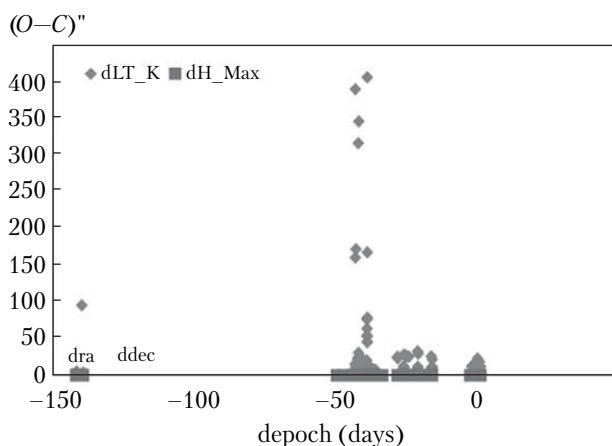
Телескоп АФУ-75, розроблений в 2010 р. ($D = 0,23$ м, $F = 0,75$ м), оснащений повнокадровою ПЗЗ-камерою (3×3)к, з полем зору (2,7×2,7)[°] та проникною здатністю до 16^m (при експозиції 120 с); телескоп використовується для спостережень КО на всіх типах орбіт [8], середньоквадратичне відхилення (СКВ) положень низькоорбітальних КО відносно ефе-



a



б



в

Рис. 3. Оцінка точності розрахунку ефемерид

мериди International laser ranging services складає (0,5–2)". Телескоп був задіяний у спільних роботах за українсько-китайським проектом «Система централізованого керування мережею оптичних телескопів» [9], в результаті виконання якого було отримано каталог 1000 положень 15 КО та обчислені їх елементи орбіт.

Телескоп Celestron було модернізовано в НДІ «МАО» у 2015 р. Телескоп використовувався для спостережень низькоорбітальних КО та дозволяв отримувати координати КО з нев'язкою ($O-C$) (*observed–calculated*) відносно початкової орбіти $\pm 3,1''$. У 2016 р. телескоп був встановлений у Словаччині на території відділення Вігорлатської обсерваторії на Колонецькому сідлі з висотою над рівнем моря 400 м. Встановлення телескопа в гірських умовах дозволило підвищити його проникну здатність на 1 зоряну величину.

У 2011 р. за участі НДІ «МАО» було організовано Українську мережу оптичних станцій (УМОС) [10]. За даними спостережень УМОС регулярно формується каталог елементів орбіт КО. В електронному каталозі на сайті УМОС [11] на сьогодні представлено 1906 наборів елементів орбіт 514 КО, отриманих із спостережень мережею за 2011–2016 рр., в тому числі 1747 наборів елементів орбіт низькоорбітальних та 160 — геосинхронних КО. Усі елементи орбіт обчислені з використанням програмного забезпечення для обчислення елементів орбіт розробленого НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету [12]. У програмі закладено чисельну модель обчислення елементів орбіт КО, в якій диференціальні рівняння інтегруються класичним методом Еверхарта 19-го порядку зі змінним кроком. Модель враховує збурення від гравітаційного потенціалу Землі, вплив Місяця, Сонця, Юпітера та Венери (на базі моделі DE/LE 405), приливи у Земній корі (на базі моделі Вара). За результатами спостережень обчислено точність прогнозування ефемерид, яка по відношенню до реальних спостережень склала для

низькоорбітальних КО з висотою орбіти більше 1000 км $\pm 1^\circ$ на період до 20 діб (рис. 3, а), а з висотою орбіти до 1000 км — до $\pm 1^\circ$ на період до 3 діб (рис. 3, б). Різке зростання похибки ефемерид на періоді більше трьох діб для КО з висотою орбіти до 1000 км можна пояснити відсутністю врахування збурень при обчисленні орбіти. Для геосинхронних КО отримано похибки обчислення ефемерид, які склали до $18''$ уздовж орбіти та до $1''$ поперек орбіти на період до 140 діб (рис. 3, в), де depoch — різниця між епохою елементів орбіт та епохою спостережень.

ВИСНОВКИ

Починаючи з 2000 р. дослідження навколоземного космічного простору в НДІ «МАО» набули бурхливого розвитку. За час від 2000 до 2016 рр. в НДІ «МАО» розроблено спеціалізовані методи та телескопи для спостережень КО. За підтримки НДІ «МАО» створено Українську мережу УМОС та розроблено ПО для обчислення елементів орбіт та ефемерид КО. Отримано каталог положень та елементів орбіт за 2011–2016 рр. Оцінено ($O-C$) ефемерид КО відносно каталогу положень. Отримано точності обчислення ефемерид КО для низькоорбітальних КО з висотою орбіти <1000 км порядку $\pm 1^\circ$ на період до 20 діб, з висотою орбіти більше 1000 км — $\pm 1^\circ$ на період до 3 діб. Для геосинхронних КО отримано похибки обчислення ефемерид, які склали до $18''$ уздовж орбіти та до $1''$ поперек орбіти на період обчислення до 140 діб.

ЛІТЕРАТУРА

1. Park M., Jo J., Cho S. Minimum Number of Observation Points for LEO Satellite Orbit Estimation by OWL Network. *J. Astron. Space Sci.* 2015. V. 32. No. 4. С. 357–366.
2. Santoni F., Piergentili F. *Result of observation campaigns for satellite orbital and attitude motion determination*. Proceedings of 6th European Conference on Space Debris. 2013. id. 164.
3. Hampf D., Wagner P., Riede W. *Optical technologies for the observation of low Earth orbit objects*. URL: <https://arxiv.org/abs/1501.05736>.

4. Sybiryakova Ye.S., Kozyryev Ye.S., Shulga A.V. The results of positional observations of near earth asteroids using the combined observation method. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. 2011. T. 109. No. 1. P. 66–70.
5. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukovs 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. Experiment on radiolocation of objects in near- earth space using VLBI in 2012. *Baltic Astronomy*. 2013. No. 22. P. 35–41.
6. Вовк В.С., Козырев Е.С., Куличенко Н.А., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. Первые результаты регулярных наблюдений низкоорбитальных космических объектов в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория». *Космична наука і технологія*. 2013. Т. 19. № 6. С. 53–59.
7. Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства. *Космична наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 4. С. 52 – 58.
8. Shulga O., Kozyryev Ye., Sybiryakova Ye., Zhenghong Tang, Yindun Mao, Yan Li, Yong Yu. *NAO and SHAO participation in the near-Earth space observations*. IAU XXVIII General Assembly Abstract Book. Beijing. 2012. C. 1253.
9. Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга О.В. Система централизованного керування мережею оптичних телескопів. *Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі*. 2013. № 8. С. 41 – 44.
10. Шульга О.В., Кравчук С.Г., Сибирякова Е.С., Білінський А.І., Благодар Я.Т., Вовчик Є.Б., Єпішев В.П., Кара І.В., Козырев Е.С., Кошкін М.І., Кудак В.І., Куличенко М.О., Любич І.В., Мажаєв О.Е., Мартинюк-Лотоцький К.А., Романюк Я.О., Терпан С.С., Шакун Л.С. Розвиток української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколосемного космічного простору. *Космична наука і технологія*. 2015. Т. 21. № 3. С. 74 – 82.
11. Українська мережа оптичних станцій. URL: <http://umos.mao.kiev.ua/ukr/>.
12. Kara I.V., Kozyruev Y.S., Sybiryakova Y.S., Shulga O.V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. 2011. V. 107. P. 98–102.

REFERENCE

1. Park M., Jo J. H., Cho S. Minimum Number of Observation Points for LEO Satellite Orbit Estimation by OWL Network. *J. Astron. Space Sci.* 2015: 357–366.
2. Santoni F., Piergentili F. *Result of observation campaigns for satellite orbital and attitude motion determination*. Prociding of 6th European Conference on Space Debris. 2013. id. 164.
3. Hampf D., Wagner P., Riede W. *Optical technologies for the observation of low Earth orbit objects*. Available: <https://arxiv.org/abs/1501.05736>.
4. Sybiryakova Ye.S., Kozyryev Ye.S., Shulga A.V. The results of positional observations of near earth asteroids using the combined observation method. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. 2011. 109(1): 66–70.
5. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukovs 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. Experiment on radiolocation of objects in near- earth space using VLBI in 2012. *Baltic Astronomy*. 2013. 22: 35–41.
6. Vovk V.S., Kozyruev Y.S., Kulichenko N.A, Sibirjakova E.S., Shul'ga A.V. Pervye rezultaty regulyarnyh nablyudenij nizkoorbitalnyh kosmicheskikh obektov v NII «Nikolaevskaya astronomicheskaya observatoriya». *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya* (Space Science and Technology). 2013. 19(6): 53–59 [in Russian].
7. Shulga O.V., Kozyruev Y.S., Sybiryakova Y.S. Mobilnyj kompleks teleskopov NII NAO dlya nablyudenij obektov okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya* (Space Science and Technology). 2012. 18(4): 52–58 [in Russian].
8. Shulga O., Kozyryev Ye., Sybiryakova Ye., Zhenghong Tang, Yindun Mao, Yan Li, Yong Yu. *NAO and SHAO participation in the near-Earth space observations*. IAU XXVIII General Assembly Abstract Book. Beijing. 2012: 1253.
9. Kozyruev Y.S., Sybiryakova Y.S., Shulga O.V. Sistema tsentralizovanoho keruvannya merezheiu optychnykh teleskopiv. *Byuleten Ukrainського центру визначення параметрів обертання Землі* (Bulletin of Ukrainian Earth Orientation Parameters Laboratory). 2013. 8: 41–44 [in Ukrainian].
10. Shulga O.V., Kravchuk S.G., Sybiryakova Y.S. Rozvytok ukraïnskoi merezhi optychnykh stantsii UMOS yak skladovoho elementu systemy kontroliu navkolozemnoho kosmichnoho prostoru. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya* (Space Science and Technology). 2015. 21(3): 74–82 [in Ukrainian].
11. *Ukraine Network of Optical Stations*. Available: <http://umos.mao.kiev.ua/eng/>.

12. Kara I.V., Kozyruev Y.S., Sybiryakova Y.S., Shulga O.V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. 2011. 107: 98–102.

*Ye. Sybiryakova, O. Shulga,
V. Vovk, N. Kaliuzniy, F. Bushuev, N. Kulichenko,
M. Haloley, V. Chernozub*

Research Institute
«Mykolaiv Astronomical Observatory»,
1, Observatorna Str., Mykolaiv, 54030, Ukraine,
tel. +38 (0512) 47-70-14, dir@mao.nikolaev.ua

THE ARTIFICIAL SATELLITES'
OBSERVATION USING THE COMPLEX
OF TELESCOPES OF RI «MAO»

Special methods, means and software for cosmic objects' observation and processing of obtained results were developed. Combined method, which consists in separated accumulation of images of reference stars and artificial objects, is the main method used in observations of artificial cosmic objects. It is used for observations of artificial objects at all types of orbits.

Keywords: artificial satellites, telescopes, combined method of observation, time delay and integration.

*Є.С. Сибірякова, А.В. Шульга, В.С. Вовк,
Н.А. Калюжний, Ф.И. Бушув, Н.А. Куличенко,
М.И. Халолей, В.М. Чернозуб*

Научно-исследовательский институт
«Николаевская астрономическая обсерватория»,
ул. Обсерваторная, 1, Николаев, 54030, Украина,
тел. + 38 (0512) 47-70-14, dir@mao.nikolaev.ua

НАБЛЮДЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ
СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЛЕКСА ТЕЛЕСКОПОВ НИИ «НАО»

Разработаны и используются специальные методы, средства и программное обеспечение для наблюдений и обработки результатов наблюдений космических объектов. Основным методом, который используется для наблюдений искусственных космических объектов, является комбинированный метод, который заключается в раздельном накоплении изображений с опорными звездами и искусственными объектами. Метод используется для наблюдений искусственных спутников на всех типах орбит.

Ключевые слова: искусственные спутники, телескопы, комбинированный метод наблюдений, режим укороченного синхронного переноса заряда.

Стаття надійшла до редакції 21.10.16