

# ВИМІРЮВАННЯ АНОМАЛЬНОГО КУТА ВІДХИЛЕННЯ СВІТЛА ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОЇ ЛОКАЦІЇ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

Ігнатенко Ю. В.<sup>1</sup>, Макеев А. О.<sup>1</sup>, Ігнатенко І. Ю.<sup>2</sup>, Тряпцін В. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кримська лазерна обсерваторія ГАО НАН України,  
сmt Кацівелі, м. Ялта, АР Крим, Україна  
e-mail: clogao@rambler.ru

<sup>2</sup>Всеросійський науково-дослідницький інститут  
фізико-технічних і радіотехнічних вимірювань,  
сmt Менделеево, Московська область, Росія

## ВСТУП

Експерименти по дослідженню аномальної аберації під час лазерної локації штучних супутників Землі (ШСЗ), наведені в роботах [1, 2], виконувались методом візуального спостереження та реєстрації «вручну». Результати спостережень були в значній мірі якісного характеру. Розроблена та запроваджена система спостереження з використанням телекамери та комп'ютера для реєстрації первинних даних дозволила покращити їхню якість та багаторазово збільшити кількість.

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

До складу лазерно-локаційної установки входять телескоп ТПЛ-1 з альт-азимутальним монтуванням і діаметром головного дзеркала 1 м, фотоприймач, система реєстрації та обробки сигналу, система супроводу супутника, система оптичного узгодження (СОУ). Джерелом випромінювання є імпульсний лазер на ітрій-алюмінієвому гранаті з домішкою неодиму з подвоєнням частоти, довжиною хвилі на виході 532 нм, тривалістю імпульсу 250 пс, частотою слідування імпульсів 3 Гц. СОУ функціонально пов'язана з телескопом, фотоприймачем, джерелом випромінювання та пристроєм візуального спостереження завдяки спеціальному джерелу світла, що імітує зірку. Всі елементи СОУ змонтовані на нерухомій частині телескопа. Це забезпечує довготривалу стабільність усіх оптичних налагоджень. СОУ дозволяє задавати і контролювати напрямок та розходження лазерного променя, що виходить з телескопа. Під час наших спостережень випромінювання було скеровано вздовж головної оптичної осі, розходження не перевищувало 8 кутових секунд.

На виході системи візуального спостереження телескопа замість окуляра була встановлена відеокамера, зображення з якої передається на монітор комп'ютера, з'єднаного з приймально-реєструючою частиною лазерно-локаційної системи. Камера була попередньо відкалібрована по парах зірок із відомою кутовою відстанню, була виправлена нерівність масштабів зображень, які зберігаються, по горизонталі та вертикалі.

Спеціально створена програма дозволяє зберігати для обробки лише ті кадри, що були на дисплеї у мить прийому відбитого від ШСЗ сигналу. Таке вдосконалення надало можливість автоматично реєструвати по декілька сотень кадрів під час одного проходження супутника на відміну від десятка точок при реєстрації «вручну».

## МЕТОДИКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Перед початком спостережень реєструється зображення штучної зірки – восьмисекундної підсвіченої зсередини розсіяним світлом діафрагми, встановленої у сполученому фокусі телескопа. Центр зображення діафрагми є відображенням головної оптичної осі телескопа, вздовж якої скероване лазерне випромінювання, узгоджене завдяки цьому джерелу світла з головним фокусом телескопа. Віртуальний приціл для наведення лазерного променя на ШСЗ також суміщається з центром зображення діафрагми, після чого воно вилучається шляхом виведення з поля зору спеціального перекидного дзеркала. Конструкція шарніра цього дзеркала така, що воно однозначно, з великою точністю, встановлюється в робоче положення.

Під час локації керування телескопом виконується автоматично за ефемеридою. Оператор корегує його положення таким чином, щоб реєструвався віддзеркалений від ШСЗ лазерно-локаційний сигнал. Схема аналізу відхилення променя при локації ШСЗ представлена на рис. 1. При цьому, зображення супутника (т. В, рис. 1) виявляється зміщеним відносно головної оптичної осі телескопа (т. А) на відстань  $\overline{AB}$ , яка

дорівнює векторній сумі проєкцій на площину зображення телескопа швидкісної аберації супутника  $\vec{AC}$  та аномального відхилення  $\vec{CB}$ .

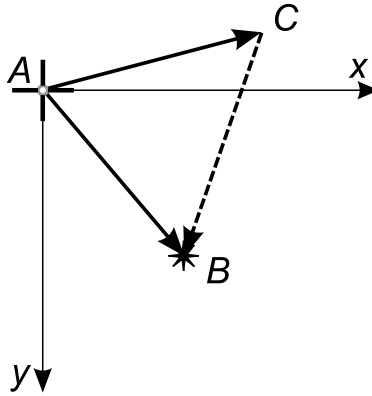


Рис. 1. Схема аналізу відхилення променя при локації ШСЗ

#### ОБРОБКА ЗАРЕЄСТРОВАНИХ КАДРІВ

Початкова обробка масиву первинних даних складається з визначення різниці координат між центром зображення ШСЗ (т.  $B$ , рис. 1) та проєкцією напрямку лазерного випромінювання на фокальну площину телескопа (т.  $A$ ) в декартовій системі координат, пов'язаній з площиною зображення. Точка  $A$  також є центром зображення штучної зірки. Після цього проводиться медіанна фільтрація відхилень по кожній з координат для видалення викидів і фільтрація ковзним середнім (величина інтервалу осереднення вибирається залежно від тривалості прольоту і щільності масиву точок). Із пар відхилень по осях абсцис та ординат складається послідовність векторів  $\vec{AB}$  (рис. 1).

Далі, для моменту часу, коли було зафіксовано вектор відхилення  $\vec{AB}$ , яке спостерігається, розраховується вектор зміщення  $\vec{AC}$ , обумовлений швидкісною аберацією супутника, за формулою  $\vec{AC} = \frac{2 \times \vec{v}}{c}$ , де  $c$  – швидкість світла,  $\vec{v}$  – проєкція швидкості супутника на площину зображення телескопа з урахуванням усіх віддзеркалень на його робочих дзеркалах. Напрямок вектора швидкісної аберації додатково перевіряється по послідовності кадрів з однією і тією ж зіркою, що «пробігає» крізь поле зору телескопа. Вектор аномального відхилення променя обчислюється за формулою  $\vec{CB} = \vec{AB} + (-\vec{AC})$ .

#### РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ З АВТОМАТИЧНОЮ РЕЄСТРАЦІЄЮ

З березня по листопад 2007 року за наведеною вище методикою було зареєстровано та оброблено декілька десятків проходжень різних ШСЗ. Оброблялись лише ті прольоти, в яких кількість точок перевищувала сто, а розмір зображення ШСЗ не перевищував  $7 \div 8''$ , що зменшувало похибку вимірювань. Крім того, оброблялись результати локації, коли супутник спостерігався практично на всій видимій частині орбіти і стан атмосфери дозволяв зареєструвати достатньо рівномірний ряд спостережень. Локація низьких супутників проходила на висоті більшій, ніж  $20^\circ$  над горизонтом, ШСЗ LAGEOS – більшій  $30^\circ$ . Час локації одного ШСЗ складав від 5 до 12 хвилин для низькоорбітальних, приблизно 20 хвилин для ШСЗ LAGEOS і до  $30 \div 60$  хвилин для високоорбітальних ШСЗ ГлоНаСС, Еталон.

На рис. 2 і 3 для ілюстрації показані результати спостережень двох проходжень ШСЗ LAGEOS-1. На рис. 2, А) і 3, А) представлені векторні діаграми, котрі відображають картину в площині зображення телескопа. Кутіві відліки вздовж кола вказані в градусах, радіальні відліки – в кутових секундах. Цифрою 1 відмічені точки спостереженого положення супутника в момент реєстрації віддзеркаленого сигналу. Цифрою 2 позначені величина і зворотній напрямок швидкісної аберації, що залежить лише від різниці швидкостей ШСЗ та станції спостереження. Цифра 3 позначає вектор аномального відхилення променя, котрий знаходиться як сума векторів з позначками 1 та 2. На графіках серії  $B$  в декартовій системі координат представлені модулі відхилень, зображених на діаграмах серії  $A$  (позначення співпадають), по осі абсцис відкладений час в годинах і хвилинах за шкалою  $UTC$ .

Звертаємо увагу на те, що рис. 2 і 3 відрізняються тим, що представлені на них результати отримані для моментів часу, що відстоять на декілька місяців один від іншого. Як можна побачити з діаграм, напрямок векторів аномального відхилення помітно відрізняється для різних епох.

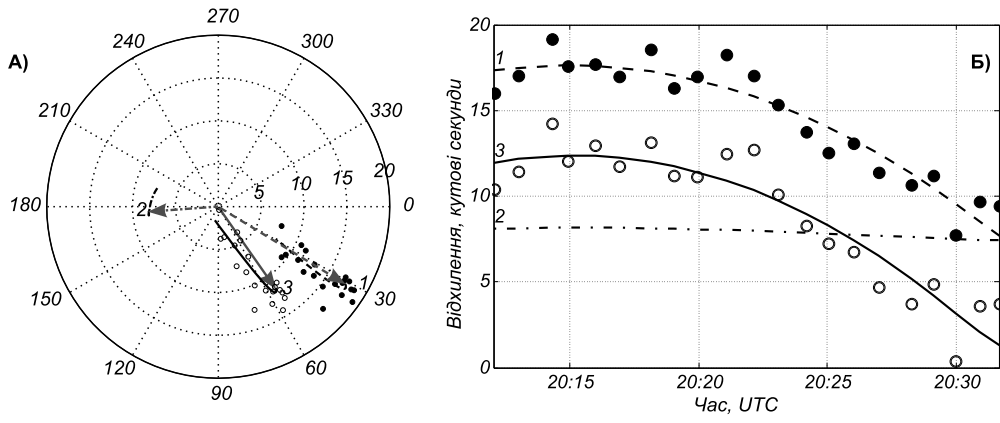


Рис. 2. ШСЗ LAGEOS-1 20 березня 2007 р.

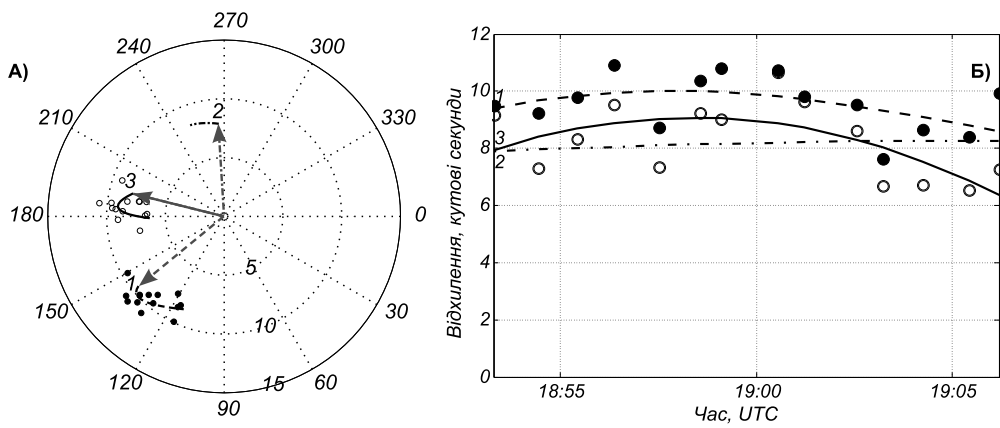


Рис. 3. ШСЗ LAGEOS-1 28 липня 2007 р.

Наприкінці наведемо графік (рис. 4) максимальних величин кута аномального відхилення лазерного променя в залежності від сезону (календарних дат). Ці величини взято з графіків серії В. На даному рисунку можна побачити сезонну залежність величини, яка досліджується.

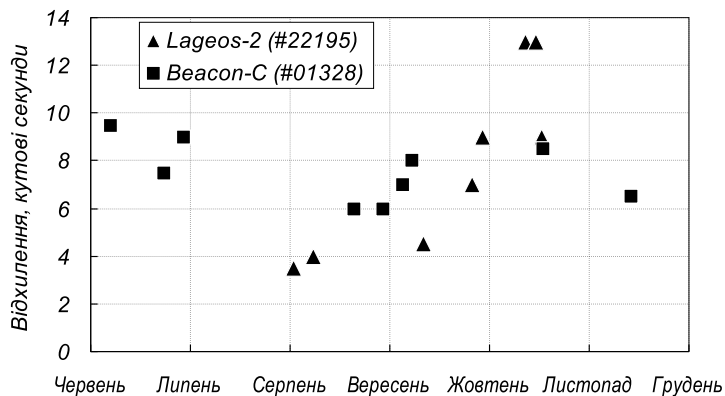


Рис. 4. Максимальні величини кута аномального відхилення світла при локації ШСЗ в залежності від сезону при телевізійній реєстрації результатів

#### ВИСНОВКИ

Завдяки використанню відеокамери та спеціального програмного забезпечення вдалось значно покращити якість і збільшити кількість спостережень за аномальним відхиленням світла при лазерній локації ШСЗ. Підвищення точності вимірювань дозволило відділити аномальне відхилення від швидкісної аберації. Розрахунки показали, що аномальне відхилення завбільшки того ж порядку, що і швидкісна аберація (максимальна величина проекції на площину зображення телескопа складає  $10 \div 12$  кутових секунд), проте, як правило, не співпадає з нею за напрямком. Простежується сезонна залежність. У майбутньому, для з'ясування причин, що викликають аномальне відхилення світла, ми плануємо з отриманих під час проходження ШСЗ проекцій скласти тривимірний вектор.

- [1] Игнатенко Ю. В., Тряпицын В. Н., Игнатенко И. Ю. *Измерение скоростной аберации при локации искусственных спутников Земли.* // Проблемы управления и информатики.- 2004.- №2.- С. 103–106.
- [2] Игнатенко Ю. В., Тряпицын В. Н., Игнатенко И. Ю. *Аномальное отклонение лазерного луча при лазерно-локационных измерениях.* // Сборник тезисов VI украинской конференции по космическим исследованиям, НЦУИКС, Евпатория.- 3.- 10 сентября 2006 г.