

УДК 520.2+520.874.7

С. В. Кузьков¹, В. П. Кузьков¹, З. Соднік², Д. В. Воловик³, С. П. Пуха³, В. В. Клещенок⁴

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Європейське космічне агентство, ESTEC, Нордвейк, Нідерланди

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

⁴ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

СИСТЕМА НАВЕДЕННЯ І СУПРОВОДЖЕННЯ ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧНИХ ТА КООРДИНАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВИСОКООРБІТАЛЬНИХ СУПУТНИКІВ

Для виконання експериментів з встановлення лазерного комунікаційного зв'язку між телескопом АЗТ-2 Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України та геостаціонарним супутником ARTEMIS Європейського космічного агентства розроблено і запущено в дію прецизійну систему супроводження цього супутника. Одночасно розроблено підсистеми наведення і супроводження, що дозволяють проводити фотометричні і координатні вимірювання високоорбітальних супутників. Розроблено методику, що дозволяє вимірювати положення фотометричного центра супутника ARTEMIS і інших рухомих відносно зірок об'єктів з похибками менш ніж 0.16".

ВСТУП

Європейське космічне агентство (ЄКА) розробило лазерну комунікаційну систему для передачі інформації між низькоорбітальним (Spot-4) і геостаціонарним (ARTEMIS) супутниками [8], а також побудувало наземну оптичну станцію (НОС) для наземно-супутникових комунікаційних досліджень [7]. Зазначені системи працюють у штатному режимі з 2003 р.

Співробітники Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України (ГАО НАНУ) та конструкторського бюро «Шторм» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») за підтримки науково-дослідного центру ESTEC ЄКА та Державного космічного агентства України розробили прилад для лазерних атмосферних та комунікаційних досліджень з геостаціонарними супутниками (ЛАКЕС) [4]. Прилад розроблено для фокуса Кассегрена 0.7 м телескопа АЗТ-2 ГАО НАНУ, він використовується

для атмосферних [2] та лазерних експериментів з геостаціонарним супутником ARTEMIS, який має орбітальне положення 21.5° сх. д. з нахилом площини орбіти понад 9° [3]. Лазерна комунікаційна система ГАО містить підсистеми для наведення і супроводження слабких та нестабільних астрономічних об'єктів [1]. Базові елементи системи розташовуються на технологічній платформі, що знаходиться у фокусі Кассегрена телескопа АЗТ-2.

СПОСТЕРЕЖНИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗІ ТЕЛЕСКОПА АЗТ-2

Спостережний комплекс складається з електронних підсистем, а також підсистем коректування руху телескопа АЗТ-2, розташованих у приміщеннях і під куполом телескопа. Комп'ютер 1 (рис. 1) з'єднується з блоком корекції та забезпечує програмне керування кроковими двигунами вздовж координат α , δ . Реалізовано віддалене керування портативним комп'ютером, що розташовується поруч з технологічною платформою (комп'ютер 3 на рис. 1).

Комп'ютер 2 працює як NTP-сервер, забезпечуючи часову синхронізацію, а також отримує

© С. В. КУЗЬКОВ, В. П. КУЗЬКОВ, З. СОДНІК,
Д. В. ВОЛОВИК, С. П. ПУХА, В. В. КЛЕЩЕНОК, 2013

сигнал (зображення) з монітора, під'єданого до телевізійної камери гіда телескопа АЗТ-2.

Комп'ютер 3 забезпечує роботу елементів розташованих безпосередньо на технологічній платформі: лазерного модуля, цифрових камер 1–3 тощо. Спеціальне програмне забезпечення виконує розрахунки даних координат орбіти супутника та забезпечує програмне ведення телескопа. Всі комп'ютери з'єднані між собою через локальну мережу Ethernet 100 Base-TX, а також через комутатор і оптичний кабель до головного сервера ГАО з пропускною здатністю зовнішнього каналу зв'язку 10 Гбіт/с.

ПІДСИСТЕМА НАВЕДЕННЯ І СУПРОВОДЖЕННЯ

Підсистема наведення і супроводження розташовується на технологічній платформі, що у 10.5-м фокусі Кассегрена телескопа АЗТ-2. Камера К1 (рис. 2) має порівняно широке поле зору ($10.6 \times 16'$), а тому використовується для наведення і виконує початкове «захоплення» об'єктів спостережень. Камера працює з фокальним редуктором, який зменшує фокусну відстань телескопа з 10.5 до 5.25 м. Камера оснащена CMOS-сенсором (2000×3000 пкл) при діапазоні експозицій від 1/1000 до 30 с і більше.

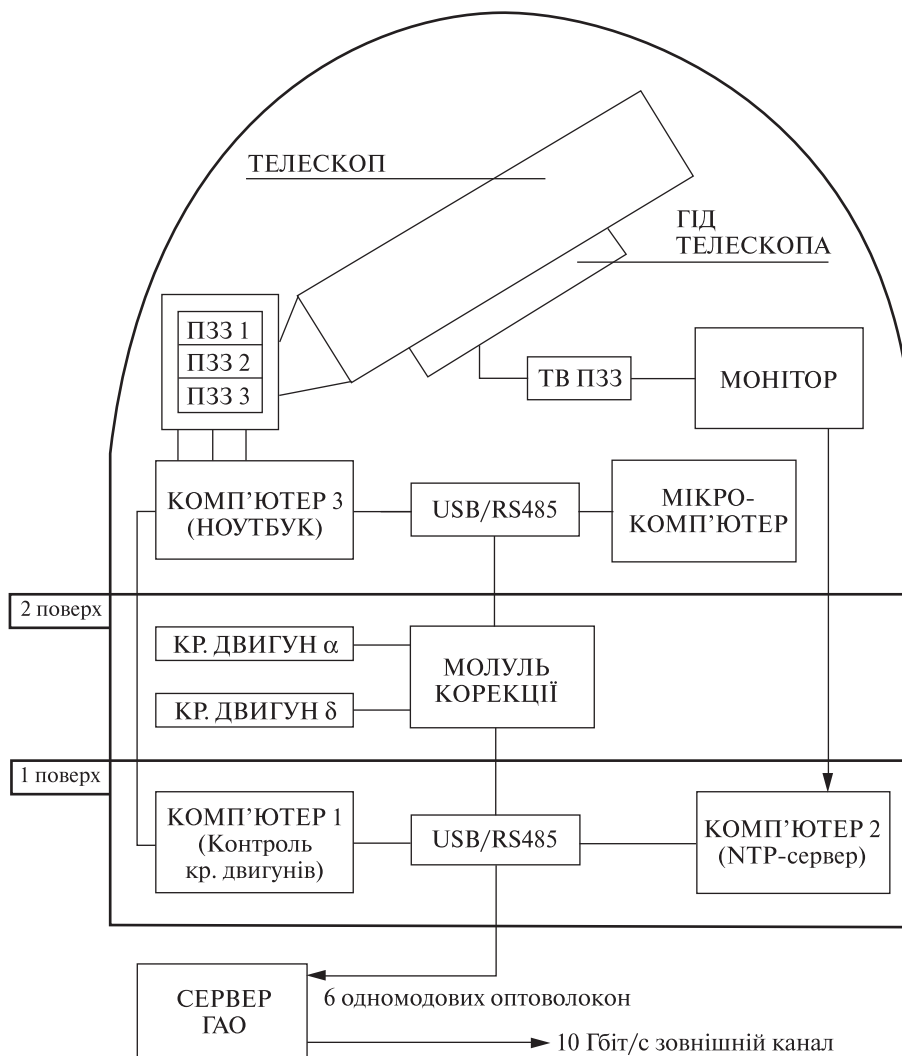


Рис. 1. Функціональна схема спостережного комплексу на базі телескопа АЗТ-2

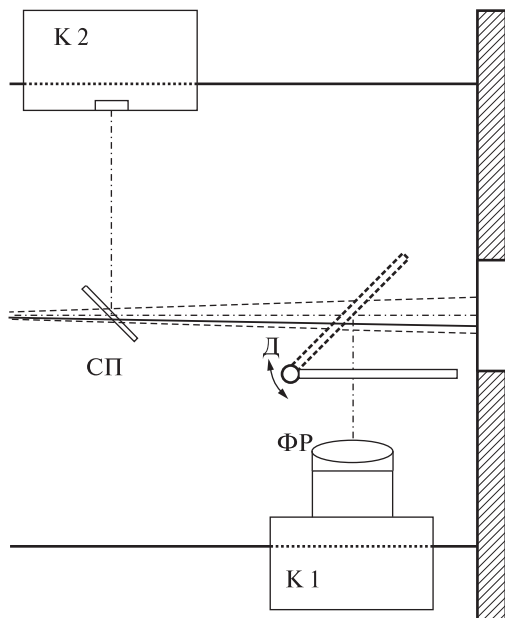


Рис. 2. Схема системи наведення і супроводження на технологічній платформі: К1, К2 – цифрові ПЗЗ-камери наведення і супроводження, Д – поворотне дзеркало, ФР – фокальний редуктор, СП – світлоподілювач

Камера К2 є 16-бітною ПЗЗ-камерою, що використовується для ведення об'єктів, «захоплених» камерою 1. Камера К2 має термоелектричне охолодження світлочутливої матриці 596×795 пкл без фокального редуктора. Розмір пікселів: 8.6 мкм (0.169") по осі X та 8.3 мкм (0.163") по осі Y . Вісь X напрямлена вздовж часового руху зірок, а вісь Y – вздовж схилення. Поле зору складає $1.6 \times 2.3'$. Можливі експозиції – від 1/1000 с до декількох годин. Більш точно вимірювання масштабу у фокальній площині телескопа можна робити перед кожним спостереженням, вимірюючи відстані між стандартними опорними зірками.

Рухоме дзеркало D перенаправляє потік світла між камерами наведення та супроводження в залежності від конкретної фази роботи системи. Приклад зображень супутника ARTEMIS і треків зорі показано на рис. 3.

ФОТОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

В загальному випадку турбулентність атмосфери згідно з теорією Колмогорова залежить від

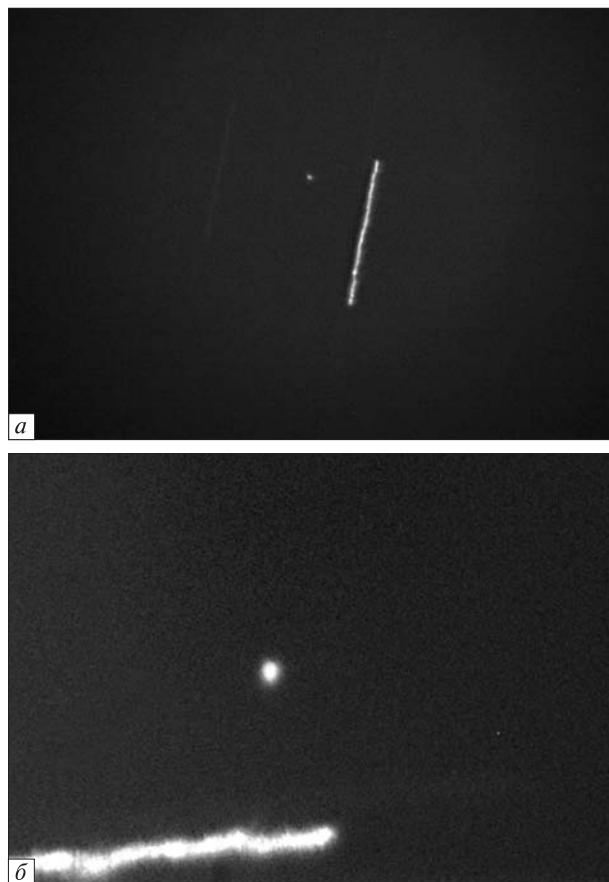


Рис. 3. Зображення супутника ARTEMIS і треків зірок, отримане за допомогою: а – CMOS-камери 1 (експозиція 10 с), б – ПЗЗ-камери 2 (експозиція 5 с)

швидкості вітру і викликає як різні зміни положення об'єкта спостережень, так і зміну його інтенсивності на різних турбулентних рівнях. Раніше нами досліджувалась двовимірна кореляція руху зоряних об'єктів в різних атмосферних умовах [1]. Що менша віддаль між об'єктами спостережень, то краща кореляція їхнього руху у фокальній площині телескопа. При якісному супроводженні зорі і відносно великих експозиціях атмосфера рівномірно «розмазує» зображення відносно його фотометричного центроїда. Диференційні рухи зображень опорних зірок досліджувалось і на більших відстанях [5, 6].

При супроводженні супутникових об'єктів є можливість вимірювати їхнє положення відносно треків зірок, що «пролітають» поблизу.

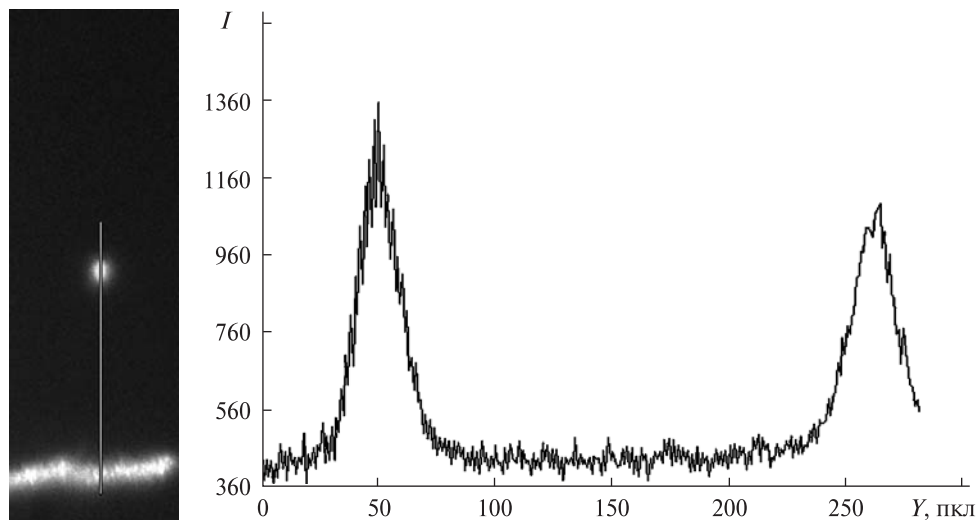


Рис. 4. Фотометричний розріз між центроїдом супутника і треком зорі

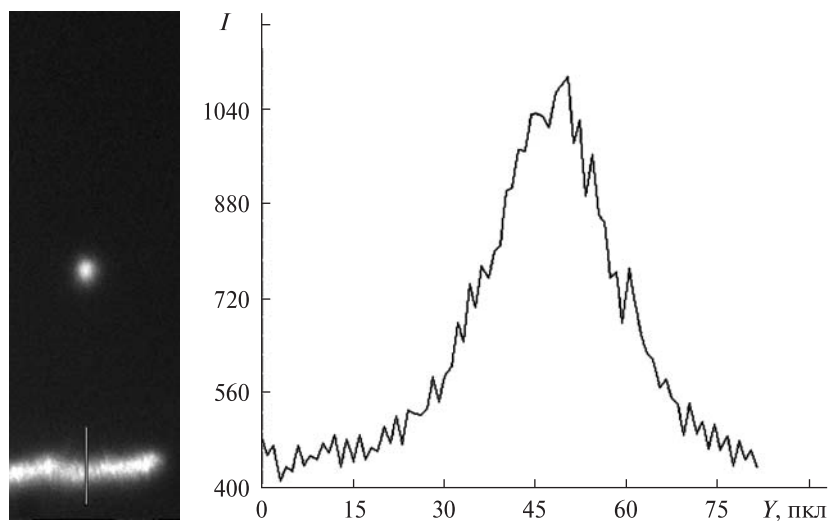


Рис. 5. Фотометричний розріз упоперек треку зорі

Розроблені нами система наведення і супроводження разом з системою корекції руху телескопа дозволяють наводитись на об'єкти до 17^m і супроводжувати зоряні об'єкти до 15^m з похибками супроводження до $0.5''$, виконувати фотометричні та координатні вимірювання. За рахунок точного супроводження супутника центроїд його фотометричного зображення має точковий характер, а його кінцевий розмір визначається часом експозиції і турбулентністю атмосфери. Відносно цього центроїда можна визначати по-

ложення зміщеного за рахунок турбулентності максимуму зображення зорі, що «пролітає» поруч.

Фотометричні і координатні вимірювання зображень супутника і треків зірок виконуються за допомогою ліцензійної версії програми MaxIm DL-5 Pro. На відміну від супутника зображення треку зорі виглядає як ламана крива через турбулентність в атмосфері.

Вимірюється точне положення супутника відносно треку зорі шляхом визначення середньої

відстані (в пікселях) між максимумом інтенсивності центроїда супутника і максимумом інтенсивності треку зорі у певній точці вздовж осі Y (рис. 4). В нашому випадку воно складає 215 пкл, або $35.045''$.

Дане положення треку зорі відносно положення супутника є приблизним. Точні положення зорі за час експозиції вираховуються після проведення серії фотометричних розрізів треку зорі вздовж осі Y з деяким кроком по осі X , наприклад 10 пкл (рис. 5).

Вимірне точне положення у часі максимуму інтенсивності треку зорі у площині фотознімка показано на рис. 6. Після усереднення положення максимуму інтенсивності треку зорі у часі можна виміряти турбулентну поправку між максимумом інтенсивності центроїда супутника і треком зорі.

Турбулентна поправка до треку зорі в точці $X = 321$ пкл складає 4 пкл вздовж осі Y , що відповідає $0.163 \times 4 = 0.652''$. Таким чином, реальне відхилення між центроїдом супутника та треком зорі складає $35.045'' - 0.652'' = 34.393''$ (рис. 6).

Для визначення положення супутника вздовж осі X визначається точний час початку експозиції супутника. Визначення часу початку експозиції зображення здійснюється шляхом аналізу фотометричного розрізу зображення вдовж осі X (рис. 7).

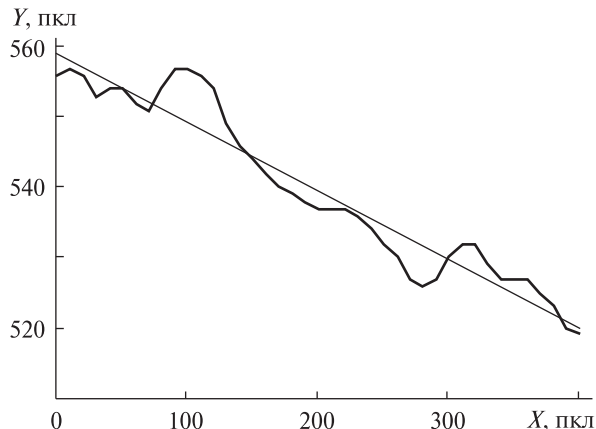


Рис. 6. Графік точного положення у часі максимуму інтенсивності треку зорі

В інформації кадра зображення зазвичай приводиться час початку експозиції. Реальний початок експозиції залежить також від часу спрацьовування затвора, різного для різних типів камер. З метою визначення реального часу початку експозиції було виміряно час затримки електронного затвора ПЗЗ-камери. Для цього спеціальна програма на екрані монітора відображала тестовий час з інтервалом 0.01 с. Наша ПЗЗ-камера наводилася на екран монітора, і синхронно здійснювалися експозиції для визначення реальної затримки затвора. Для підвищення точності вимірювань часу затримки затвора використо-

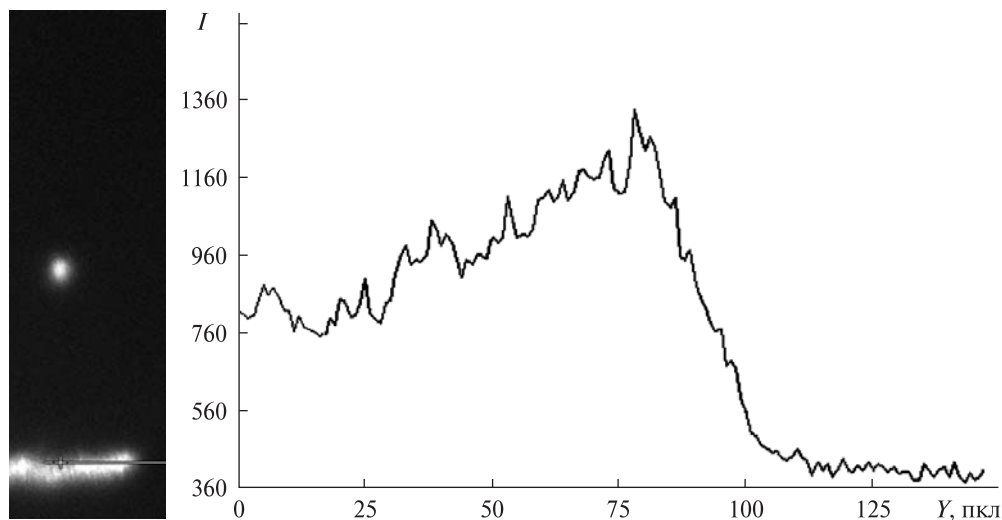


Рис. 7. Фотометричний розріз треку зорі вдовж осі X для визначення початку експозиції

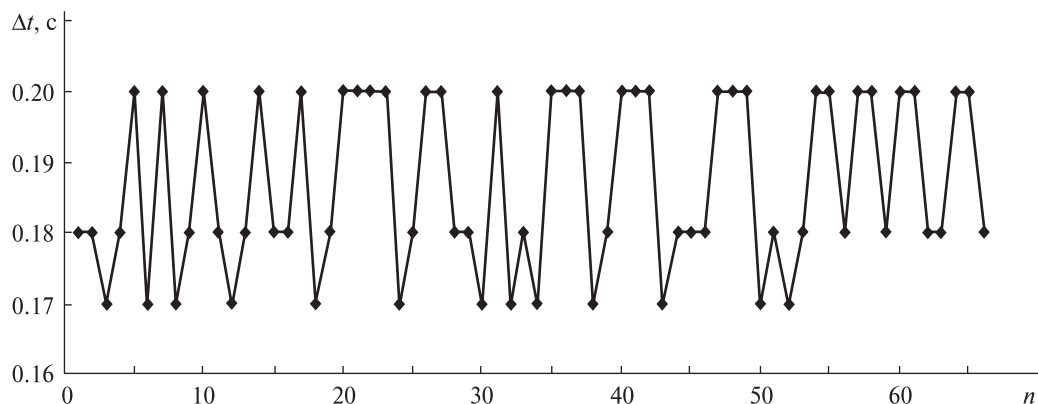


Рис. 8. Протокол 66 вимірювань затримки затвору ПЗЗ-камери

бував окремих NTP-сервер з синхронізацією часу через пряму зовнішню IP-адресу. Графік 66 вимірювань затримки затвору приведено на рис. 8. Середнє значення затримки затвора склало 0.187 с. Це значення ми використали як поправку і ввели у програму MaxIm DL-5 Pro для остаточного визначення часу початку експозиції. Після цього початок експозиції кожного кадра відображається з точністю 0.01 с.

Таким чином було визначено, що відстань між центроїдом супутника і треком зорі складає 34.719". Реальна точність визначення положення супутника вздовж осі Y складає близько 1 пкл, або 0.16".

Точність позиціонування вздовж осі X залежить від точності визначення часу експозиції, яка в нашому випадку складає 0.01 с. Швидкість руху зорі складає близько 15" за секунду часу. Виходячи з цього, точність позиціонування вздовж осі X складає 0.15". При відстані до супутника ARTEMIS у 38100 км це відповідає визначенню його положення на орбіті з похибками у 27.4 м.

ВИСНОВКИ

Використовуючи розроблену систему наведення і супроводження нестабільного геостационарного супутника, запропоновано методику визначення точного положення фотометричного центра супутника відносно треку зорі, що пролітає поруч. При цьому визначається положення фотометричного центроїда рухомих відносно зірок аст-

рономічних об'єктів з похибками 0.16" вздовж осі Y (схилення) та 0.15" вздовж осі X (часовий кут), що при відстані до супутника ARTEMIS у 38100 км відповідає 27.4 м.

1. Кузьков В. П., Воловик Д. В., Кузьков С. В. и др. Системы наведения и сопровождения телескопа для лазерных коммуникационных экспериментов с геостационарным спутником // Космична наука і технологія. — 2009. — 15, № 5. — С. 68–73.
2. Kuz'kov V., Andruk V., Sodnik Z., et al. Investigating the correlation between the motions of the images of close stars for laser communications experiments with the ARTEMIS satellite // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2008. — 24, N 1. — P. 56–62.
3. Kuz'kov V., Volovyk D., Kuzkov S., et al. Realization of laser experiments with ESA's geostationary satellite ARTEMIS // Космична наука і технологія. — 2010. — 16, № 2. — С. 65–69.
4. Kuzkov V., Volovyk D., Kuzkov S., et al. Laser ground system for communication experiments with ARTEMIS // Proceedings of International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS-2012), Ajaccio, Corsica, France, October 9–12 (2012), 3–2., <http://icsos2012.nict.go.jp/contents/program.html>
5. Lazorenko P. F. Autocorrelation function and power spectrum for detrended measurements // Kinematika Fiz. Nebes. Tel. — 1997. — 13, N. 2. — P. 78–95.
6. Lazorenko P. F. Differential image motion at non-Kolmogorov distortions of the turbulent wave-front // Astron. and Astrophys. — 2002. — 382. — P. 1125–1137.
7. Reyes M., Alonso A., Sodnik Z., et al. Ground to space optical communication characterization // Proc. SPIE. — 2005. — 5892. — P. 1–16.
8. Tolker-Nielsen T., Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical inter satellite link between ARTEMIS

and SPOT4, SILEX // Proc. SPIE. — 2002. — 4635. — P. 1—15.

Стаття надійшла до редакції 20.02.13

*С. В. Кузьков, В. П. Кузьков, З. Содник,
Д. В. Воловик, С. П. Пуха, В. В. Клещонюк*

**СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ
ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ И КООРДИНАТНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ
СПУТНИКОВ**

Для осуществления экспериментов по осуществлению лазерной коммуникационной связи между телескопом АЗТ-2 Главной астрономической обсерватории НАН Украины и геостационарным спутником ARTEMIS Европейского космического агентства разработано и запущено прецизионную систему сопровождения этого спутника. Одновременно разработаны подсистемы наведения и сопровождения, что позволяет проводить фотометрические и координатные измерения этого и других высоко орбитальных спутников. Разработана методика, которая позволяет проводить измерения фотометричес-

кого центра спутника ARTEMIS и других движущихся по отношению к звездам объектов с погрешностями меньше 0.16".

*S. V. Kuzkov, V. P. Kuzkov, Z. Sodnik,
D. V. Volovyk, S. P. Pukha, V. V. Kleshchonok*

**A PRECISE POINTING AND TRACKING SYSTEM
FOR PHOTOMETRIC AND COORDINATE
MEASUREMENTS OF HIGH-EARTH-ORBIT
SATELLITES**

A precise pointing and tracking system was developed to carry out laser communication experiments between the AZT-2 telescope of the Main Astronomical Observatory of NAS of Ukraine and the geostationary satellite ARTEMIS of the European Space Agency. At the same time, subsystems for pointing and tracking were elaborated which allow one to perform photometric and coordinate measurements for high-Earth-orbit satellites. A procedure was developed to determine the photometric centre position for the ARTEMIS satellite and other astronomical objects moving relative to stars with an error less than 0.16 arcsec.