

МЕТОД ОПРАЦЮВАННЯ СИНХРОННИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОКРИТТІВ ЗІР АСТЕРОЇДОМ ІЗ КІЛЬКОХ ПУНКТІВ

Розмір і форма астероїда належать до основних його характеристик. Серед багатьох методів отримання цих параметрів може бути використаний метод спостереження покриттів зір астероїдами завдяки можливості залучення великої кількості спостерігачів – аматорів астрономії. Запропоновано новий метод зведення спостережень покриттів із віддалених пунктів, які отримують результати незалежно. Такий метод планується використовувати для проведення спостережень об'єднанням спостерігачів покриттів в Україні.

Ключові слова: астероїди, покриття зір.

Вступ. Розмір і форма астероїда належать до основних його характеристик. Без знання цих величин неможливо визначити густину й альbedo астероїдів. Усі ці параметри необхідні для вивчення розподілу речовин у Сонячній системі. А це у свою чергу потрібно для розуміння фундаментальних процесів утворення й еволюції Сонячної системи. Існує кілька методів визначення діаметрів астероїдів. Історично першим масовим методом визначення діаметрів астероїдів був фотометричний метод, який за умови прийняття значення альbedo давав можливість оцінити ефективний діаметр астероїда, наприклад [9]. Але у цьому разі виникає можливість неправильно вибрати альbedo, що призведе до систематичної похибки в оцінюванні діаметрів. Інший спосіб реалізовано у проєкті Near Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer (NEOWISE) [6, 7]. У цьому проєкті використовують комбіновані оцінки блиску у видимій і середній інфрачервоній ділянках спектра. Це дає можливість незалежного оцінювання альbedo астероїдів і, як наслідок, підвищує точність оцінки розмірів. Проте точність залежить від прийнятої моделі, яка визначає альbedo астероїда. Найбільш точним і повним методом є вимірювання параметрів астероїдів за допомогою космічних місії. Вони відомі, це – Near-Earth Asteroid Rendezvous, Giotto, Galileo, Deep Space, Deep Impact, Hyabusa, Dawn, Stardust, Rosetta, та DART [8]. Але космічні місії надзвичайно дорогі проєкти та дозволяють охопити незначну кількість астероїдів. Для великих астероїдів використовують метод зображень із високим кутовим розділенням (high-angular-resolution imaging) на телескопах VLT та КЕСК [11]. Усього таким чином встановлено розміри та форму 42 астероїдів. Ще один спосіб вимірювання діаметрів астероїдів – за допомогою інтерферометра. Такий інструмент був створений на базі чотирьох 8,2-метрових телескопів, які перебувають на невеликій відстані між ними [5]. Він має назву Very Large Telescope Interferometer-Midinfrared Interferometric Instrument (VLTI-MIDI). Але через унікальність цього інструмента він зрідка використовується для визначення діаметрів, хоча було кілька вдалих визначень діаметра і форми астероїдів.

З іншого боку є прямий спосіб визначення діаметрів і форми астероїдів, який не потребує унікальних інструментів і може бути використаний навіть на невеликих телескопах [10]. Для цього треба спостерігати покриття зір астероїдом. Фіксуючи тривалість покриття і знаючи за ефемеридами швидкість астероїда, можна легко порахувати хорду (або частину діаметра астероїда), через яку проходить видимий шлях зір. Навіть одиничні спостереження покриттів, тобто визначення однієї хорди, можуть бути корисними при вдалому розташуванні спостерігача в зоні проходження тіні астероїда [1]. Але найцікавішими є спостереження покриттів із кількох пунктів. У такому випадку ми маємо набір хорд на різних відстанях від центра астероїда. Указані дані допомагають не тільки уточнити діаметр, але їх можна використати для встановлення форми астероїдів. В Україні розпочато роботи зі створення мережі спостерігачів покриттів, яка об'єднує кілька аматорів і професійних астрономів із Києва й Одеси [2]. У такому разі стає дуже актуальним питання про службу часу, яка повинна мати відповідну точність для зведення незалежних віддалених спостережень в єдину систему. Для вирішення цього питання була розроблена й активно впроваджується серед спостерігачів служба часу на GPS-приймачі [3, 4]. У цій роботі запропоновано метод зведення віддалених спостережень покриттів зір для визначення розмірів і форми астероїдів.

Алгоритм зведення спостережень в одну систему. Алгоритм побудовано на використанні ефемерид, в яких розраховано трек астероїда на поверхні Землі. Такі ефемериди можна знайти за адресою <https://asteroidoccultation.com>. У них наведено координати точок, через які проходить центр тіні астероїда, і відповідні моменти часу. Для точки, яка розміщена на цьому треку, необхідно обчислити момент, який відповідає найменшій відстані від положення проєкції центра астероїда (максимальній фазі покриття). Від цього моменту треба відрахувати моменти покриття і відкриття зірки. Фрагмент із подібних ефемерид наведено в таблиці. У ній записано координати точки максимальної фази покриття: довгота і широта у градусах, мінутах і секундах, Всесвітній час, який відповідає цим координатам, висота й азимут зір у градусах на цей момент, а також висота Сонця у градусах. Зрозуміло, що бажано проводити спостереження, коли закінчуються астрономічні сутінки (або ще не почалися), тобто Сонце має висоту менше ніж -17° . Далі в таблиці вказано довготи, де проходять межі тіні астероїда, з урахуванням попередніх оцінок розмірів астероїда. Оскільки параметри руху астероїда і його розміри відомі з деякими похибками, то наступні дані таблиці показують можливі межі зміщення границь тіні за рахунок цих похибок.

Таблиця

Фрагмент ефемериди покриття зір UCAC4 595-015044 астероїдом 845 Naema 30 жовтня 2022 р.

Centre			Star	Star	Sun	Path Limits		Error Limits	
E. Longitude	Latitude	U.T.	Alt	Az	Alt	Limit 1	Limit 2	Limit 3	Limit 4
						Latitude	Latitude	Latitude	Latitude
49°00'00"	46°51'43"	0 ^h 57 ^m 12.6 ^s	62°	240°	-25°	47°15'46"	46°27'48"	47°41'10"	46°02'49"
48°00'00"	47°32'19"	0 ^h 57 ^m 24.6 ^s	62°	237°	-26°	47°56'17"	47°08'29"	48°21'36"	46°43'34"
47°00'00"	48°12'07"	0 ^h 57 ^m 36.4 ^s	63°	235°	-26°	48°36'00"	47°48'21"	49°01'13"	47°23'32"
46°00'00"	48°51'06"	0 ^h 57 ^m 48.1 ^s	63°	232°	-27°	49°14'54"	48°27'26"	49°40'01"	48°02'42"
45°00'00"	49°29'16"	0 ^h 57 ^m 59.6 ^s	63°	230°	-27°	49°52'58"	49°05'42"	50°18'00"	48°41'04"

Розглянемо траєкторію руху максимальної фази покриття по поверхні Землі і положення пункту спостереження відносно цієї траєкторії. Обставини покриття показано на рисунку. Точки A і C – найближчі точки ефемеридного треку астероїда до пункту спостережень B . BE – відстань від точки спостережень до треку. Геоцентричні координати цих точок відповідно (φ_A, λ_A) , (φ_B, λ_B) , (φ_C, λ_C) .

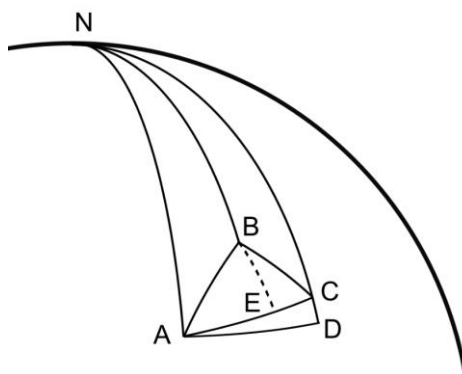


Рис. До обчислень максимальної фази покриття для пункту спостереження (точка B): AC – відрізок ефемеридного треку астероїда; BE – відстань від точки спостережень до треку; CD – різниця широт точок A і C ; N – північний полюс

Очевидно, що $NA = \pi/2 - \varphi_A$, $NB = \pi/2 - \varphi_B$, $NC = \pi/2 - \varphi_C$, $AD = \lambda_C - \lambda_A$, $CD = \varphi_C - \varphi_A$. На малих відстанях на поверхні Землі можна не враховувати різницю радіусів для відповідних точок рисунка. Тоді, використовуючи формули сферичної тригонометрії, для трикутника ABC можна записати таке:

$$\begin{aligned} \cos AB &= \sin \varphi_A \cdot \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cdot \cos \varphi_B \cdot \cos(\lambda_B - \lambda_A), \\ \cos BC &= \sin \varphi_C \cdot \sin \varphi_B + \cos \varphi_C \cdot \cos \varphi_B \cdot \cos(\lambda_C - \lambda_B). \end{aligned}$$

З прямокутного трикутника ACD

$$\cos AC = \cos(\varphi_C - \varphi_A) \cdot \cos(\lambda_C - \lambda_A).$$

Кут BAC можна знайти із співвідношення

$$\cos \angle BAC = \frac{\cos BC - \cos AC \cdot \cos AB}{\sin AC \cdot \sin AB}.$$

З прямокутного трикутника ABE

$$\begin{aligned} \sin BE &= \sin AB \cdot \sin \angle BAC, \\ \sin AE &= \frac{\sin AB \cdot \cos \angle BAC}{\cos BE}, \\ \sin \angle ABE &= \frac{\sin AE}{\sin AB}. \end{aligned}$$

Різницю довгот можна знайти за формулою

$$\tan(\lambda_E - \lambda_A) = \tan(\lambda_C - \lambda_A) \cdot \frac{\tan AE}{\tan AC}.$$

Далі інтерполяцією за ефемеридними даними можемо визначити момент часу найбільшої фази покриття і широту φ_E . Врахуємо еліптичність Землі, яка приводить до того, що радіус для даного пункту спостереження може відрізнятися від середнього. Тоді прямокутні геоцентричні координати точок спостереження розраховують за формулами

$$x = \frac{R_e \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}, \quad y = \frac{R_e \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}, \quad z = \frac{R_e \cdot (1 - e^2) \cdot \sin \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}.$$

де R_e – екваторіальний радіус Землі, e – перший ексцентриситет еліпсоїда. Він визначається як

$$e = \sqrt{\frac{R_e^2 - R_n^2}{R_e^2}},$$

де R_n – полярний радіус Землі.

Довжина відрізка s , який з'єднує точки B і E , буде таким:

$$s = \sqrt{(x_B - x_E)^2 + (y_B - y_E)^2 + (z_B - z_E)^2}.$$

Остаточну відстань хорди d , яку отримують із тривалості покриття, від центра астероїда обчислюємо так:

$$d = s \cdot \cos(A_0 - A_E) \cdot \cos Z_0,$$

де A_0 і Z_0 – азимут і зенітна відстань астероїда в момент покриття, A_E – азимут напрямку на точку E , який знаходимо за формулами

$$\sin \angle ABN = \frac{\cos \varphi_A \cdot \sin(\lambda_B - \lambda_A)}{\sin AB},$$

$$A_E = 2\pi - \angle ABN - \angle ABE.$$

Маючи кілька хорд та їхні відстані від центра астероїда для різних пунктів спостереження, ми можемо відновити форму проєкції астероїда на Землю для вказаного покриття. Завдання цього алгоритму полягало у знаходженні відстані d даного пункту спостережень від траєкторії центра астероїда для того, щоб будувати залежність розміру хорди астероїда від відстані до його центра. Для повного зведення треба враховувати моменти початку і кінця покриття відносно моменту максимальної фази, яку знаходять інтерполяцією за довжиною сторони AE відомих моментів часу, коли центр тіні перебуває в точках A і C .

Висновок. Запропоновано метод визначення відстані до центра тіні пункту спостереження покриття зорі астероїдом і моменту максимальної фази, який необхідний для зведення багатьох результатів спостережень із багатьох пунктів в одну систему. Така процедура потрібна для уточнення розмірів і форми проєкції астероїда.

Список використаних джерел

- Kleshchonok V. V. Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini-Zinner / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky, and M. V. Lashko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2021. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–51.
- Kleshchonok V. V. Star occultation by small bodies of the Solar system: current state of observations in Ukraine / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky et al. // *Space Sci. & Technol.*, 2022. – V.28(5). – P. 56–65.
- Kleshchonok V. V. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system / V. V. Kleshchonok, M. I. Buromsky // *Кинематика і фізика небесних тел.* – 2005. – Т. 21, № 5-додаток. – С. 405–408.
- Kleshchonok V. V. The Kyiv electronic database of television observations of star occultations by the moon/ V. V. Kleshchonok, N. I. Buromskii, I. V. Khat'ko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 2008. – Vol. 24, Iss. 2. – P. 114–118.
- Li J.-Y. Measuring the sizes, shapes, surface features and rotations of Solar System objects with interferometry. / J.-Y. Li, M. J. Kuchner, R. J. Allen, S. S. Sheppard // *Icarus*, 2011. – V. 211, iss. 2. – P. 1007–1021.
- Mainzer A. Preliminary results from NEOWISE: an enhancement to the wide-field infrared survey explorer for solar system science/ A. Mainzer, J. Bauer, T. Grav, et al. // *The Astrophysical Journal.* – 2011. – V. 731, iss. 1. – Id. 53. – 13 pp.
- Masiero, J. R. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5 / J. R. Masiero, A. K. Mainzer, J. M. Bauer et al. // *The Planetary Science Journal*, 2020. – V. 1, iss. 1. – Id.5. – 10 pp.
- Nakano R. NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART): Mutual Orbital Period Change Due to Reshaping in the Near-Earth Binary Asteroid System (65803) Didymos / R. Nakano, M. Hirabayashi, H. F. Agrusa, et al. // *The Planetary Science Journal*, 2022. – V. 3, iss. 7. – Id.148. – 16 pp.
- Stokes G. H. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) / G. H. Stokes, J. B. Evans, H. E. M. Vigg, et al. // *Icarus.* – 2000. – V. 148, iss. 1. – P. 21–28.
- Tanga P. Asteroid occultations today and tomorrow: toward the GAIA era. / P. Tanga, M. Delbo // *Astron. and Astrophys.*, 2007. – V. 474. – P.1015–1022.
- Vernazza P. VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis / P. Vernazza, M. Ferrais, L. Jorda et al. // *Astron. and Astrophys.*, 2021. – V. 654, id.A56.

References

- Kleshchonok V. V. Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini-Zinner / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky, and M. V. Lashko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2021. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–51.
- Kleshchonok V. V. Star occultation by small bodies of the Solar system: current state of observations in Ukraine / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky et al. // *Space Sci. & Technol.*, 2022. – V.28(5). – P. 56–65.
- Kleshchonok V. V. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system / V. V. Kleshchonok, M. I. Buromsky // *Кинематика і фізика небесних тел.* – 2005. – Т. 21, № 5-supplement. – С. 405–408.
- Kleshchonok V. V. The Kyiv electronic database of television observations of star occultations by the moon/ V. V. Kleshchonok, N. I. Buromskii, I. V. Khat'ko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 2008. – Vol. 24, Iss. 2. – P. 114–118.
- Li J.-Y. Measuring the sizes, shapes, surface features and rotations of Solar System objects with interferometry. / J.-Y. Li, M. J. Kuchner, R. J. Allen, S. S. Sheppard // *Icarus*, 2011. – V. 211, iss. 2. – P. 1007–1021.
- Mainzer A. Preliminary results from NEOWISE: an enhancement to the wide-field infrared survey explorer for solar system science/ A. Mainzer, J. Bauer, T. Grav, et al. // *The Astrophysical Journal.* – 2011. – V. 731, iss. 1. – Id. 53. – 13 pp.
- Masiero, J. R. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5 / J. R. Masiero, A. K. Mainzer, J. M. Bauer et al. // *The Planetary Science Journal*, 2020. – V. 1, iss. 1. – Id.5. – 10 pp.
- Nakano R. NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART): Mutual Orbital Period Change Due to Reshaping in the Near-Earth Binary Asteroid System (65803) Didymos / R. Nakano, M. Hirabayashi, H. F. Agrusa, et al. // *The Planetary Science Journal*, 2022. – V. 3, iss. 7. – Id.148. – 16 pp.
- Stokes G. H. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) / G. H. Stokes, J. B. Evans, H. E. M. Vigg, et al. // *Icarus.* – 2000. – V. 148, iss. 1. – P. 21–28.
- Tanga P. Asteroid occultations today and tomorrow: toward the GAIA era. / P. Tanga, M. Delbo // *Astron. and Astrophys.*, 2007. – V. 474. – P.1015–1022.
- Vernazza P. VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis / P. Vernazza, M. Ferrais, L. Jorda et al. // *Astron. and Astrophys.*, 2021. – V. 654, id.A56.

Надійшла до редколегії 31.10.22

V. Kleshchonok, PhD
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

METHOD OF PROCESSING SYNCHRONOUS OBSERVATIONS OF STAR OCCULTATION BY AN ASTEROID FROM SEVERAL POINTS

The size and shape of the asteroid belongs to its main characteristics. Knowledge of these quantities is necessary to determine the density and albedo of asteroids, as well as to understand the fundamental processes of formation and evolution of the solar system. The most popular method for determining these values for asteroids is the photometric method. However, the accuracy of its determination depends on the asteroid heating model used. There are direct methods for determining the shape - measurements using space missions and ground-based interferometers using the largest telescopes. Such methods give accurate results, but are not applicable for mass determinations. The method of observing the occultations of stars by asteroids is available to a wide range of observers, including amateur astronomers. A community of observers is being formed in Ukraine, who plan to start regular observations of these phenomena. When processing such observations, you need to know the exact position of individual observers and have a detailed occultation ephemeris, which can be found at <https://asteroidoccultation.com>. It is also necessary to have a good time service, which will allow determining the moments of the beginning and end of the occultation with sufficient accuracy. Detailed ephemeris provides information about the trajectory of the shadow on the Earth's surface, indicating the exact time the shadow was in the given coordinates. The ephemeris also contains information about the horizontal coordinates of the star for the center of the shadow at the same time points. The ephemeris also gives the coordinates of the edges of the shadow and their errors, which include the errors of the predetermined asteroid diameter and the errors of the parameters of the asteroid's orbit. The article provides a method for calculating the distance from the observation point to the trajectory of the shadow and a method for calculating the moment of time of the maximum occultation phase for a given observation point. It is possible to combine all independent observations into a single system to determine the diameter and shape of the asteroid knowing these values. This method is planned to be used for processing observations of the Ukrainian community of observers of occultations of stars by asteroids.

Keywords: asteroids, star occultations.