

**УДК** 520.82, 520.88  
**PACS** 95.85.Kr, 96.25.De, 96.25.Vt  
**DOI** 10.24144/2415-8038.2019.45.134-140

В.І. Кудак<sup>1</sup>, Л.С. Шакун<sup>2</sup>, В.М. Періг<sup>1</sup>, В.Є. Саваневич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, вул. Далека 2а, Ужгород, 88000, Україна, e-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

<sup>2</sup>Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, вул. Маразлієвська, 1В, Одеса, 65014, Україна

<sup>3</sup>Головна астрономічна обсерваторія, Національної академії наук України, вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, 03143, Україна

## ПОРІВНЯННЯ ТОЧНОСТЕЙ ПОЛОЖЕНЬ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ РІЗНИМ ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Визначення точності отриманих положень геосинхронних об'єктів за допомогою різного програмного забезпечення. Метою було оцінити систематичні і випадкові похибки вимірювань за допомогою програмного забезпечення Apex II та CoLiTecSat. Для оцінки точності роботи програмного забезпечення (ПЗ) було вибрано п'ять геосинхронних супутників для яких можна отримати точну координатну інформацію з сервісів міжнародної мережі лазерної віддалеметрії. Використані астрометричні методи досліджень об'єктів, а також математичні методи обробки результатів. Порівняння результатів проводилось за допомогою пакету Kotlin Orbit Estimation Library. Розглянуто відхилення вздовж та впоперек орбіти положень п'яти супутників отриманих за допомогою ПЗ Apex II та CoLiTecSat. Орбіта супутників була обрахована на основі точної ефемериди з міжнародної мережі лазерної віддалеметрії. Випадкові похибки одного вимірювання ПЗ Apex II та CoLiTecSat на представленому матеріалі відрізняються не суттєво. Відмінності в оцінках середньо квадратичного відхилення (СКВ) для телескопу BRC-250M не дозволяють зробити висновок про те, яке ПЗ забезпечує меншу випадкову помилку вимірювань.

**Ключові слова:** супутник, координати, похибки, ефемериди.

### Вступ

Визначення точних астрометричних координат штучних супутників Землі (ШСЗ), є важливою задачею для побудови орбіти супутників та контролю небезпечних зближень ШСЗ в навколосемному космічному просторі. В статті приведено порівня визначення точності екваторіальних координат геосинхронних ШСЗ за допомогою різного програмного забезпечення – Apex II та CoLiTecSat.

ПЗ Apex II використовується в мережі оптичних спостережень ISON<sup>1</sup> (International

Scientific Optical Network), воно пройшло досить довгий шлях вдосконалень та модифікацій. З іншої сторони тестувалося нещодавно створене ПЗ CoLiTecSAT<sup>2</sup>, що розроблено в Україні.

В якості об'єктів для спостереження вибрані штучні супутники Землі, по яким наявна точна координатна інформація з міжнародної мережі лазерної віддалеметрії.

### Опис ефемерид

Представлені порівняння вимірюваних координат ШСЗ з ефемеридами, International Laser

<sup>1</sup><http://astronomer.ru/project-ison.php>

<sup>2</sup><http://www.neoastrosoft.com>

<sup>3</sup><https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>

<sup>4</sup><http://www.igs.org/>

Ranging Service (ILRS)<sup>3</sup> та Global Navigation Satellite Systems (GNSS)<sup>4</sup>. Обидва сервіси публікують свої ефемериди в виді таблиць моментів часу і відповідних їм декартовим координатам супутника в International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Для отримання координат і швидкостей космічного апарата (КА) в потрібний момент часу ці таблиці координат (ефемериди) потрібно інтерполювати.

Ефемериди ILRS, публікуються в форматі Consolidated Prediction Format (CPF) [1]. ILRS ефемерида представляє собою прогноз майбутніх положень супутника по відношенню до моменту фактичних спостережень супутника і моменту її публікації. Отже ILRS ефемерида – це екстраполяція положень супутника в майбутнє. Ці ефемериди охоплюють проміжок часу від однієї доби для низькоорбітальних супутників до 7 діб для високоорбітальних супутників. При цьому точність ефемериди швидко погіршується по мірі віддалення від її початку. Більшість ефемерид перекриваються по часу. Для випадків з КА, що наведені нижче в таблиці 2, проміжок часу однієї ефемериди знаходиться в діапазоні від 4 до 6 діб. Ефемериди для цих КА, як правило, оновлюються раз за добу.

Для обчислення положення супутників на великих інтервалах часу (більше 1 доби) використовується останній прогноз, що передуює даному моменту часу. Таким чином, зазвичай, для визначення положення і швидкості супутника по ILRS ефемеридам використовуються прогнози положення супутника, що відстають від початкової дати прогнозу не більше ніж на одну добу.

Ефемериди, що надаються GNSS і використані нами публікуються в sp3 форматі в системі координат Global Reference Frame (IGb08) [2]. Використані GNSS ефемериди публікуються через тиждень після проведення спостережень. Ці GNSS ефемериди представляють собою апроксимацію спостережень навігаційних супутників з врахуванням вимірних параметрів обертання Землі. Наслідком цього є більш висока точність GNSS

ефемериди в порівнянні з ILRS ефемеридою.

Одна ефемерида, що публікується сервісом GNSS, охоплює проміжок 23 години і 45 хвилин, публікується один раз на добу. Тому, при використанні GNSS ефемерид утворюється розрив в часі між ефемеридами протяжністю в 15 хвилин, зазвичай в районі опівночі по всесвітньому часу. При цьому на краях окремих ефемерид може спостерігатись деяке зниження точності внаслідок крайових ефектів інтерполяції.

## **Порівняння в термінах вздовж і поперек видимої траєкторії руху супутника**

Найбільш важлива особливість оптичних спостережень супутників пов'язана з їх високою рухливістю на зображенні в порівнянні з іншими астрономічними об'єктами. У типовій ситуації видиме зміщення супутника за час експозиції зображення перевищує кутові розміри функції розсіювання точкових об'єктів. Що призводить до витягування зображення супутника уздовж його напрямку руху, якщо телескоп супроводжує зірки, або до витягування зображень зірок, якщо телескоп супроводжує супутник. Таким чином, при обробці зображень виникає виділений напрям, що збігається з напрямком руху супутника.

Крім витягування зображень точкових об'єктів, висока швидкість видимого руху ШСЗ підвищує вимоги до точності вимірювання моментів часу експозиції зображення ШСЗ в порівнянні з типовими вимогами, що пред'являються до астрономічних зображень. Так для низькоорбітальних об'єктів видима кутова швидкість супутника може перевищувати 1000"/сек. Для вимірювання координат такого об'єкта з точністю порядку 0.1", точність вимірювання часу повинна перевищувати 0.0001 секунди. Похибки вимірювання часу будуть проявлятися у вигляді зсуву положення об'єкта уздовж його видимої траєкторії.

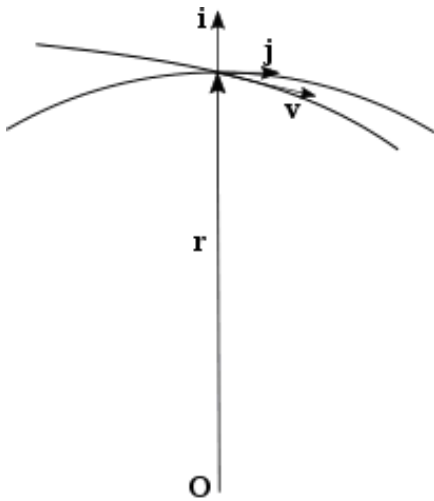


Рис. 1: Система координат вздовж і впоперек видимого шляху супутника. Всі вектори на рисунку лежать в площині рисунка.

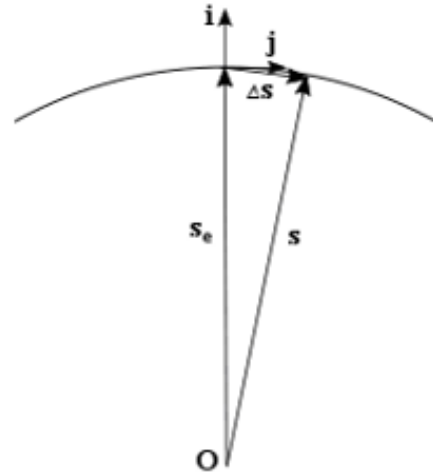


Рис. 2: Розклад вектора нев'язок на  $dR$  і  $dL$  компоненти.

Табл. 1: Географічні координати і характеристики телескопу BRC-250M

Координати		Характеристики	
$\varphi$	48.°563551	D	250 mm
$\lambda$	22.°453751	F	1280 mm
$h$	231.0	роздільна здатність	1.46 ''/pix
		FOV	100'

Табл. 2: Перелік супутників, що спостерігалися

Назва супутника	Norad ID	Висоти супутника (км)
Galileo-102	37847	23220
Galileo-203	40544	23220
Galileo-212	41860	23220
Beidou G5	38091	35800
IRNSS 1B	39635	35800

З огляду на ці особливості бажано розглядати нев'язки вздовж і впоперек видимого руху супутника. У разі відомих топоцентричних координат супутника  $\mathbf{r}$  і його вектора швидкості  $\mathbf{v}$  можна ввести миттєву систему координат як (рис. 1)

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{r}}{r}, \mathbf{j} = [\mathbf{k} \times \mathbf{i}], \mathbf{k} = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{v}|} \quad (1)$$

Вектор  $\mathbf{k}$  перпендикулярний площині рисунка,  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – орти системи координат

(вісь  $x$  направлена вздовж напрямку на ШСЗ, вісь  $y$  співпадає з видимим напрямком руху ШСЗ, вісь  $z$  – перпендикулярна видимому напрямку руху ШСЗ);  $r$  – довжина вектора  $\mathbf{r}$ . Вектор нев'язок  $\Delta \mathbf{s} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_e$  може бути розкладений на координати ( $dR, dL, dN$ ) в системі координат. Де  $\mathbf{s}_e = \mathbf{r}/r$  напрям візування на супутник, а  $r$  – довжина вектора  $\mathbf{r}$ .

Компонент вектора нев'язок  $dR$  завжди буде другого порядку по величині, приймаючи до уваги, що довжина вектора нев'язок завжди мала (рис. 2).

Видима кутова швидкість руху ШСЗ визначається як  $v_{vis} = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{j})/r$ . Тоді відставання або випередження ШСЗ по видимому шляху в термінах часу можна оцінити як  $dT = dL/v_{vis}$ .

### Оцінка систематичної і випадкової помилки вимірювань

Для реалізації методів порівняння, використовувалася ПЗ Kotlin Orbit Estimation Library (KOrbEstLib) [3]. Для оцінок величини випадкової і систематичної помилки вимірювань проводилося порівняння вимірювань координат ШСЗ з ефемеридами, що надавалися службами IIRS і GNSS. Точність IIRS для об'єктів, що розглядаються, краще 10м, а GNSS краще 1м.

Набір матеріалу для аналізу проводився на телескопі BRC-250M, що розміщений на станції спостережень Деренівка. Географічні координати і характеристики телескопу наведені в табл. 1. Обробка зображень виконувалася за допомогою програм CoLiTecSAT і Apex II [4]. Список ШСЗ для яких були отримані вимірювання координат представлені в таблиці 2.

У таблиці 3 представлені статистичні оцінки характеристик нев'язок для даних супутників. Для цензурування грубих помилок використовувався поріг  $\alpha = 0.001$ . Для порівняння оцінок стандартних відхилень (СКВ) нев'язок між результатами вимірювань ПЗ Apex II і CoLiTecSAT обчислювалося відношення:

$$F = \frac{\sigma_{apex}^2}{\sigma_{colitec}^2}, \text{ якщо } \sigma_{apex}^2 > \sigma_{colitec}^2,$$

$$F = \frac{\sigma_{colitec}^2}{\sigma_{apex}^2}, \text{ якщо } \sigma_{apex}^2 < \sigma_{colitec}^2. \quad (2)$$

Далі обчислювалась ймовірність  $P_{n-1,m-1}(F)$ , того що значення одної оцінки СКВ більше іншої [5], у відповідності з розподілом Фішера, де  $n, m$  відповідна кількість вимірювань для кожного ПЗ після процедури цензурування грубих помилок. В таблиці приведена величина  $\alpha_F = 1 - P_{n-1,m-1}(F)$ .

Кількість вимірювань для ШСЗ Galileo – 102 (37847), Galileo - 203 (40544), Galileo

– 212 (41860), отриманих на телескопі BRC-250M, в кожній серії менше або дещо більше 10 (таблиця. 3). СКВ одного вимірювання сильно варіюються від супутника до супутника, що викликано малою кількістю вимірювань. По-перше, мала кількість вимірювань перешкоджає виявленню грубих помилок. А по-друге, грубі помилки у свою чергу можуть призводити до істотно завищених оцінок СКВ.

Для геосинхронного ШСЗ IRNSS 1b (41860) на телескопі BRC-250M було отримано більше 20 вимірювань, що вже дозволило виявити і відкинути ряд грубих помилок вимірювань. Серед вимірювань, що брали участь у порівнянні з ефемеридами, у CoLiTecSAT було виявлено три грубих помилки, а у Apex II одна. При цьому Apex II відкинув на одну грубу помилку більше ніж CoLiTecSAT на попередньому етапі, до порівняння з ефемеридею.

У таблиці 3 також представлені оцінки СКВ для геостаціонарного ШСЗ Beidou G5 (38091). Для Apex II було виявлено 5 грубих помилок з 52 вимірювань, а для CoLiTecSAT 3 грубих помилки при тій же кількості вимірювань.

### Висновки

У всіх розглянутих випадках, коли вимірювання проводилися за допомогою Apex II і CoLiTecSAT, оцінка величини  $\alpha_F$  не становила менше 0,001. Таким чином, відмінності в оцінках СКВ по BRC-250M не дозволяють зробити висновок про те, яке ПЗ забезпечує меншу випадкову помилку вимірювань.

Оцінки СКВ одного вимірювання уздовж видимого шляху ШСЗ знаходяться в діапазоні від 0.33" до 1.8", поперечному напрямі – від 0.1" до 1.9". Мала кількість вимірювань і досить високий рівень СКВ одного вимірювання не дозволяють зробити однозначний висновок про наявність або відсутність систематичних зміщень між вимірюваннями і ефемеридею. Відносно високий рівень СКВ може бути обумовлений низьким рівнем роздільності, оскільки усі зображення були отримані при бініруванні 2, що призводить до оцінки кутової роздільно-

Табл. 3: Статичні характеристики нев'язок для спостережуваних ШСЗ

Супутник	Дата YYMMDD	Програма обробки	$dL$ (arcsec) сер. $\sigma$	$dN$ (arcsec) сер. $\sigma$	$dT$ (sec) сер. $\sigma$	$N$ ( $\alpha > 0.001$ )
37847	20181105	Apex II	-1.375 0.337	0.217 0.181	-0.046 0.011	5(5)
	20181105	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-1.054 0.997 0.13	0.054 0.091 0.20	-0.035 0.033	7(7)
40544	20181024	Apex II	-1.293 0.604	0.021 0.319	-0.044 0.021	28(28)
	20181024	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-1.986 1.819 0.0052	-0.081 0.416 0.26	-0.068 0.063	18(18)
39635	20181024	Apex II	-0.947 1.166	-0.472 0.499	-0.064 0.079	28(27)
	20181024	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-0.999 0.856 0.22	0.1795 0.302 0.10	-0.068 0.058	29(26)
41860	20181031	Apex II	-0.562 0.876	-0.630 0.776	-0.019 0.031	5(5)
	20181031	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-2.686 1.322 0.34	-2.341 1.908 0.17	-0.095 0.047	10(10)
38091	20181024	Apex II	-1.049 1.077	0.1597 0.423	-0.070 0.072	28(23)
	20181024	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-1.107 1.289 0.34	0.3603 0.453 0.44	-0.074 0.086	28(25)
	20181031	Apex II	-0.708 0.694	0.039 0.353	-0.048 0.0466	20(20)
	20181031	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-0.648 1.396 0.07	-0.209 0.793 0.043	-0.044 0.0936	20(20)
	20181105	Apex II	-0.876 0.414	0.713 0.193	-0.059 0.028	4(4)
	20181105	CoLiTecSAT $\alpha_F$	-0.656 0.368 0.44	0.562 0.181 0.48	-0.044 0.025	4(4)

сті зображення 2.9"/pix. Таким чином СКВ в перерахунку до пікселів знаходиться в діапазоні від 0.11 до 0.66, що порівняно за величиною з результатами для телескопів з великою кутовою роздільною здатністю.

Можна зробити висновок, що випадкові похибки одного вимірювання ПЗ CoLiTecSAT і Apex II на представленому матеріалі відрізняється не суттєво.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ricklefs R.L. Consolidated Laser Ranging Prediction Format Version 1.01 [Електронний ресурс] / R.L. Ricklefs // ILRS report – 2006. – Режим доступу: [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2006/cpf\\_1.01.pdf](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2006/cpf_1.01.pdf).
- [2] Crespi M. Global and local reference frames / M. Crespi, A. Mazzoni, G. Colosimo // Rendiconti Lincei. – 2015. – V. 26 (Suppl. 1). – P. 25–31.
- [3] Shakun L. S. Features of Kotlin Orbit Estimation Library / L.S. Shakun // Odessa Astronomical Publications. – 2018. – V. 31. – P. 191 – 195.
- [4] Devyatkin A. V. Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations / A.V. Devyatkin, D.L. Gorsharov, V.V. Kouprianov, I.A. Verestchagina // Solar System Research. – 2010. – V. 44 (1). – P. 68–80.
- [5] Lehmann E.L. Testing statistical hypotheses / E.L. Lehmann, J. P. Romano – Springer Science & Business Media. – 2006. – 408 p.

Стаття надійшла до редакції 09.07.2019

В.И. Кудак<sup>1</sup>, Л.С. Шакун<sup>2</sup>, В.М. Периг<sup>1</sup>, В.Е. Саваневич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория космический исследований Ужгородського національного університета, ул. Далекая 2а, Ужгород, 88000, Украина, e-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

<sup>2</sup>Научно-Исследовательский институт «Астрономическая обсерватория» Одеського національного університета им. И.И. Мечникова, ул. Маразлиевская, 1В, Одеса, 65014, Украина

<sup>3</sup>Главная астрономическая обсерватория, Национальной академии наук Украины, ул. Академика Заболотного, 27, Киев, 03143, Украина

## СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТЕЙ ПОЛОЖЕНИЙ ГЕОСИНХРОННОЙ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНЫМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ

Определение точности полученных положений геосинхронной объектов с помощью различного программного обеспечения. Целью было оценить систематические и случайные погрешности измерений с помощью программного обеспечения Apex II и CoLiTecSat. Для оценки точности работы программного обеспечения (ПО) было выбрано пять геосинхронной спутников для которых можно получить точную координатную информацию из сервисов международной сети лазерной локации. Используются астрометрические методы исследования объектов, а также математические методы обработки результатов. Сравнение результатов проводилось с помощью пакета Kotlin Orbit Estimation Library. Рассмотрены отклонения вдоль и поперек орбиты положений пяти спутников полученных с помощью ПО Apex II и CoLiTecSat. Орбита спутников была рассчитана на основе точной эфемериды по международной сети лазерной локации. Случайные погрешности одного измерения

ПО Apex II и CoLiTecSat на представленном материале отличаются не существенно. Различия в оценках средне квадратического отклонения (СКО) для телескопа BRC-250M не позволяют сделать вывод о том, какое ПО обеспечивает меньшую случайную ошибку измерений.

**Ключевые слова:** спутник координаты погрешности эфемериды.

V.I. Kudak<sup>1</sup>, L.S. Shakun<sup>2</sup>, V.M. Perig<sup>1</sup>, V.E. Savanevych<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of space research, Uzhhorod national university, 2a Daleka Street, 88000 Uzhhorod, Ukraine, e-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

<sup>2</sup>Astronomical observatory of Odessa National University, 1B Marazlievskaya street, 65014 Odessa, Ukraine

<sup>3</sup>Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, 27 Akademika Zabolotnogo Street, 03143 Kyiv, Ukraine

## COMPARISON OF THE GEOSYNCHRONOUS OBJECTS POSITION ACCURACY WITH DIFFERENT SOFTWARE

**Purpose.** Determinate the accuracy of the received positions of geosynchronous objects with the help of different software. Evaluate systematic and random measurement errors using the Apex II and CoLiTecSat software. To evaluate the accuracy of the software, five geosynchronous satellites were selected for which accurate coordinate information can be obtained from the services of the international network of laser ranging.

**Methods.** Used astrometric methods of objects research, as well as mathematical methods of processing results. The results were compared using the Kotlin Orbit Estimation Library.

**Results.** Deviations along and across the orbits of the positions of the five satellites obtained using the Apex II and CoLiTecSat software are considered. Satellite orbits were calculated on the basis of exact ephemeris from the international network of laser ranging.

**Conclusions.** Random errors of one measure of software Apex II and CoLiTecSat on the presented material differ significantly. The differences in the estimation of root mean square (RMS) on BRC-250M do not allow to conclude which software provides a smaller random measurement error.

**Keywords:** satellite, coordinates, errors, ephemeris.

### REFERENCES

- [1] Ricklefs, R.L. (2006), «Consolidated Laser Ranging Prediction Format Version 1.01», ILRS report, available at: [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2006/cpf\\_1.01.pdf](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2006/cpf_1.01.pdf).
- [2] Crespi, M., Mazzoni, A., Colosimo, G. (2015), «Global and local reference frames», *Rendiconti Lincei*, V. 26, Suppl.1, pp. 25–31.
- [3] Shakun, L.S. (2018), «Features of Kotlin Orbit Estimation Library», *Odessa Astronomical Publications*, V. 31, pp. 191–195.
- [4] Devyatkin, A.V., Gorshanov, D.L., Kouprianov, V.V., Verestchagina, I.A. (2010), «Apex I and Apex II software packages for the reduction of astronomical CCD observations», *Solar System Research*, V. 44, Iss. 1, pp. 68–80.
- [5] Lehmann, E.L., Romano, J. P. (2006), *Testing statistical hypotheses*, Springer Science & Business Media, 408 p.