

**М.П. Калюжний<sup>1</sup>, Ф.І. Бушуєв<sup>1</sup>, Є.С. Сибірякова<sup>1</sup>, О.В. Шульга<sup>1</sup>, Л.С. Шакур<sup>2</sup>,  
В. Безруков<sup>3</sup>, В.Ф. Кулішенко<sup>4</sup>, С.С. Москаленко<sup>5</sup>, Є.В. Малиновський<sup>6</sup>, О.А. Балагура<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ «МАО»),  
вул. Обсерваторна, 1, Миколаїв, 54032, Україна, +38 (0512) 47-70-14

<sup>2</sup> Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова (НДІ «АО» ОНУ),  
вул. Маразлієвська, 1В, Одеса, 65014, Україна, +38 (048) 722-03-96

<sup>3</sup> Вентспільська вища школа, вул. Інженерна, 101, Вентспілс, LV-3601, Латвія, +37163629657

<sup>4</sup> Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, Харків, 61002, Україна, +38 (057) 706-14-15

<sup>5</sup> Західний центр радіотехнічного спостереження, вул. Космонавтів, Мукачеве, 89612, Україна, +38 (0313) 12-33-16

<sup>6</sup> Рівненська Мала академія наук учнівської молоді, вул. Симона Петлюри, 17, Рівне, 33013, Україна, +38 (0362) 26-69-89

<sup>7</sup> Державне підприємство «Укркосмос», вул. Бориспільська, 9, Київ, 02099, Україна, +38 (044) 369-51-52

## МОНІТОРИНГ ОРБІТАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ГЕОСТАЦІОНАРНОГО СУПУТНИКА МЕТОДОМ БАЗИСНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ ЦИФРОВОГО СУПУТНИКОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ



*Наведено результати визначення орбітального положення геостационарного супутника «Eutelsat-13B», отримані протягом 2015–2016 рр. за допомогою європейської мережі станцій прийому сигналів DVB-S, випромінюваних супутником. До складу мережі входять п'ять станцій, розташованих в Україні і Латвії. Станції оснащені радіотехнічним комплексом, розробленим в НДІ «МАО». Вимірюваним параметром є різниця у часі приходу сигналу DVB-S до станцій мережі або TDOA (Time Difference Of Arrival). Похибки визначення TDOA і координат супутника, які були отримані з використанням чисельної моделі руху супутника, дорівнюють  $\pm 2,6$  та  $\pm 35$  м відповідно. Програмна реалізація чисельної моделі була взята з астродинамічної бібліотеки OREKIT з відкритими кодами.*

*Ключові слова:* орбіта геостационарного супутника, DVB-S, TDOA, радіоінтерферометр.

У серпні 2011 року науково-дослідним інститутом «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ «МАО») було проведено експеримент по спостереженню геостационарного супутника «HotBird-9» двома станціями прийому сигналів цифрового супутникового телебачення, просторово рознесеними приблизно на відстань 150 км [1]. Експеримент проводився з метою розробки незалежного методу контролю майбутнього українського геостационар-

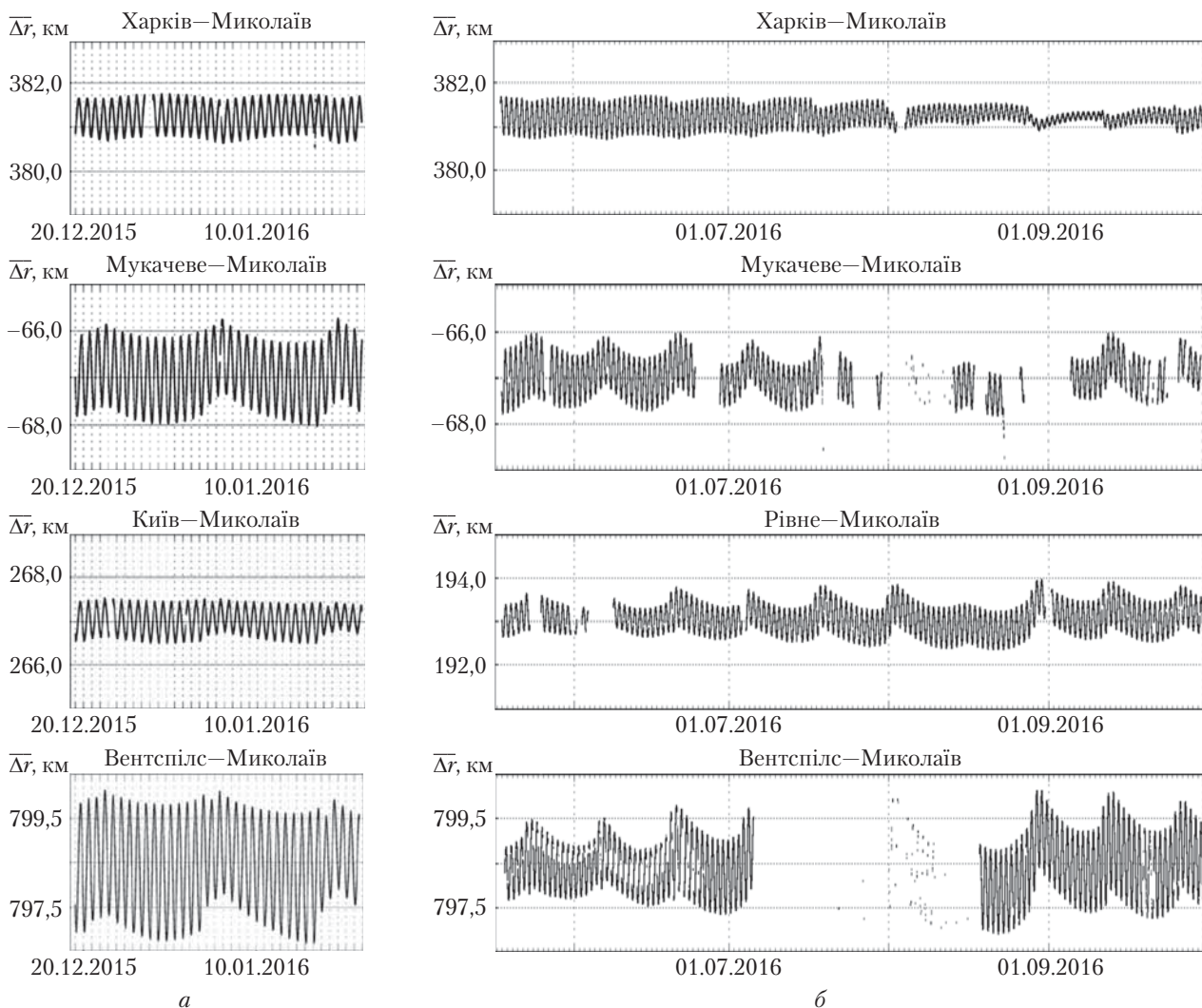
ного супутника «Либідь» і базувався на використанні методу радіоінтерферометрії та методу пасивної радіолокації. Слід зазначити, що вказаний підхід розглядається Європейським космічним агентством як альтернатива звичайним методам дистанціонування геостационарних супутників. Відповідний проект PaCoRa (Passive Correlation Ranging) був виконаний в 2010–2013 рр. [2]. На сьогодні науково-дослідним інститутом «МАО» створена європейська мережа пасивного кореляційного моніторингу (МПКМ) геостационарних телекомунікаційних супутників у складі з п'яти станцій, розташованих в Україні і Латвії.

© М.П. КАЛЮЖНИЙ, Ф.І. БУШУЄВ,  
Є.С. СИБІРЯКОВА, О.В. ШУЛЬГА, Л.С. ШАКУН,  
В. БЕЗРУКОВ, В.Ф. КУЛІШЕНКО, С.С. МОСКАЛЕНКО,  
Є.В. МАЛИНОВСЬКИЙ, О.А. БАЛАГУРА, 2017

### ЄВРОПЕЙСЬКА МЕРЕЖА МОНІТОРИНГУ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ

Станції мережі розташовані в Харкові, Мукачевому, Рівному, Миколаєві (Україна) і Вентспілсі (Латвія). Базова відстань між станціями вздовж широти і довготи складає приблизно 1000 км. Станція у Вентспілсі почала регулярні спостереження в грудні 2015 року, а станція у Рівному – в березні 2016 року. До лютого 2016 року до складу мережі входила станція, розта-

шована в Києві. Крім станцій до складу мережі входить центр обробки спостережень, розташований у Миколаєві. Мережа укомплектована радіотехнічним комплексом, розробленим в НДІ «МАО». Детальний опис апаратного і програмного забезпечення комплексу наведено в [3]. Обладнання станцій мережі дозволяє здійснювати щосекундні синхронізовані по GPS (Global Positioning System) записи фрагментів сигналу DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) з



**Рис. 1.** Різниці нахилених дальностей  $\overline{\Delta r}$ , отримані МПКМ для двох періодів часу: *a* – від 19.12.2015 до 30.01.2016, *б* – від 18.05.2016 до 30.09.2016. Значення  $\overline{\Delta r}$  наведені для наступних пар станцій (зверху–вниз): *a* – Харків–Миколаїв, Мукачеве–Миколаїв, Київ–Миколаїв, Вентспілс–Миколаїв, *б* – Харків–Миколаїв, Мукачеве–Миколаїв, Рівне–Миколаїв, Вентспілс–Миколаїв

виходу квадратурного детектора приймачів цифрового супутникового телебачення. Тривалість фрагмента складає 200 мкс, а довжина відповідної вибірки з номінальною частотою дискретизації  $f_n = 51,2$  МГц дорівнює 10 240. З урахуванням структури сигналу DVB-S ці щосекундні вибірки комплексного сигналу перетворюються у вибірки реального сигналу, які архівуються і по Internet передаються в центр обробки спостережень. У центрі обробки спостережень виконується кореляційний аналіз вибірок і обчислюються щосекундні значення різниці в часі приходу сигналу DVB-S на станції мережі або TDOA (Time Difference Of Arrival) [4]:

$$\Delta\tau_i = \left( \frac{n_{xi}}{k \cdot f_n} + \tau_{iPPS} \right) - \left( \frac{n_0}{k \cdot f_n} + \tau_{0PPS} \right) + \Delta\tau_{hi}, \quad (1)$$

де  $\Delta\tau_i$  — значення TDOA, обчислене для  $i$ -ї і 0-ї станцій;  $n_{xi}$  — зміщення максимуму кореляційної функції від початку вибірки, отриманої  $i$ -ю станцією;  $n_0$  — задане зміщення середньої частини вибірки нульової станції;  $k$  — вимірний коефіцієнт пропорційності між дійсною і номінальною частотами дискретизації аналого-цифрового перетворювача (АЦП);  $\Delta\tau_{hi}$  — вимірне значення апаратної затримки, обумовлене різницею електричних довжин приймальних трактів станцій та наявністю відносного зсуву часу синхронізації станцій внаслідок, наприклад, різної довжини кабелів зниження антен їхніх приймачів GPS;  $\tau_{0PPS}$ ,  $\tau_{iPPS}$  — задані початкові затримки сигналів PPS (Pulse-Per-Second) GPS приймачів станцій. Значення  $n_{xi}$  і  $n_0$  вимірюються у відліках частоти дискретизації. Розмір середньої частини вибірки нульової станції дорівнює об'єму вибірки корелятора і завжди менше об'єму вибірки АЦП. Коефіцієнт  $k = 0,97655$  є константою для вибраного типу АЦП. Значення  $\tau_{PPS}$  залежать від геостационарної позиції контрольованого супутника і для супутника «Eutelsat-13B» дорівнюють 1270, -215, 642, 0, 2660 і 888 мкс для станцій у Харкові, Мукачевому, Рівному, Миколаєві, Вентспілсі і Києві відповідно. Достовірність оцінок TDOA, обчислених за формулою (1), підтверджена в роботі

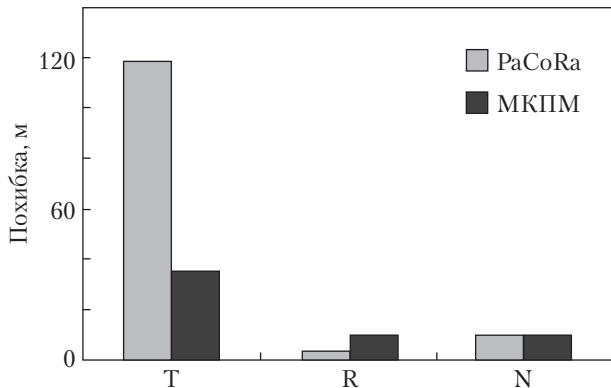


Рис. 2. Похибки визначення координат супутника системою PaCoRa і МКПМ. Літери T, R і N відповідають тангенціальній, радіальній і нормальній координатам супутника

[4] шляхом порівняння з модельними значеннями, отриманими з використанням ефемерид контрольованого супутника, розміщених на сайті [www.space-track.org](http://www.space-track.org) в TLE-форматі.

У НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету було розроблено спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє по вимірних мережею значеннях TDOA знайти орбітальне положення контрольованого супутника. При цьому параметри орбіти визначаються методом найменших квадратів з використанням двох моделей руху супутника: аналітичної моделі SGP4/SDP4 і чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника. Визначення орбіти супутника за допомогою чисельної моделі здійснюється з урахуванням збурень, викликаних гравітаційним тяжінням Сонця і Місяця (JPL (Jet Propulsion Laboratory) Planetary and Lunar Ephemerides DE405/DE406) та гравітаційним тяжінням несферичної Землі (модель EIGEN-6S [5]). Програмна реалізація моделей руху взята з астродинамічної бібліотеки з відкритими кодами OREKIT (ORbital Extrapolation KIT).

### РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ СУПУТНИКА «EUTELSAT-13B»

Графіки зміни у часі вимірних значень різниці нахилених дальностей  $\Delta r$ , отриманих МКПМ протягом двох періодів часу від 19.12.2015 до 30.01.2016 і від 18.05.2016 до 30.09.2016, наведені

на рис. 1, а і б відповідно. Різниця нахилених дальностей  $\overline{\Delta r}$  обчислювалися усередненням щосекундних значень  $\Delta r = \Delta \tau \cdot c$  на інтервалі 60 с, де  $\Delta \tau$  — TDOA для даної пари станцій, а  $c$  — швидкість світла у вакуумі. При цьому на рис. 1, а наводяться графіки  $\overline{\Delta r}$ , отримані (зверху—вниз) для пар станцій Харків—Миколаїв, Мукачеве—Миколаїв, Київ—Миколаїв, Вентспілс—Миколаїв, а на рис. 1, б — для цих же пар станцій, за винятком пари Київ—Миколаїв, яка замінена на Рівне—Миколаїв. Статистичний аналіз показав, що медіанне значення середньоквадратичної похибки  $\Delta r$  дорівнює  $\pm 2,6$  м для всіх пар станцій. Проведені обчислення також показали, що чисельна модель руху супутника має меншу похибку наближення до виміряних значень TDOA, ніж аналітична модель SGP4/SDP4.

Похибки системи PaCoRa і МПКМ наведені на рис. 2. Літери T, R і N на діаграмі відповідають тангенціальній, радіальній і нормальній координатам супутника в локальній системі координат. Із наведених даних випливає, що максимальна похибка, отримана для тангенціальної координати і для МПКМ, складає 35 м, що на 84 м менше, ніж похибка системи PaCoRa. При цьому похибки МПКМ дорівнюють оцінкам стандартного відхилення координат супутника на епоху елементів орбіти за результатами обробки виміряних значень TDOA за допомогою чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника, тоді як похибки системи PaCoRa отримані в результаті чисельного моделювання [6]. На жаль, параметри моделювання в [6] не наводяться.

### ВИСНОВКИ

Європейською мережею пасивного кореляційного моніторингу у складі п'яти просторово рознесених станцій прийому цифрового супутникового телебачення виконано спостереження супутника «Eutelsat-13В» на протязі майже року — від грудня 2015 до вересня 2016 року. Похибка визначення TDOA дорівнює  $\pm 2,6$  м. Похибка визначення координат супутника з використанням чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника склала  $\pm 35$  м.

*Стівробітники Вентспільської вищої школи висловлюють щире подяку за допомогу в отриманні результатів в рамках Латвійського національного проекту дослідницьких програм «Next Generation Information and Communication Technologies (NexIT) New Generation Large Volume Data Processing Systems».*

### ЛІТЕРАТУРА

1. Bushuev F.I., Kalyuzhny N.A., Shulga A.V., Slivinsky A.P. *Using signals of satellite television to determine the distance to telecommunications geostationary satellites*. The Abstract Book of the International Conference «Astronomical Research: From Near-Earth Space to the Galaxy». Mykolaiv, Ukraine. 2011. С. 13–14.
2. *Passive correlation ranging (PaCoRa)*. URL: <https://artes.esa.int/projects/passive-correlation-ranging-pacora> (Last accessed: Dec. 05, 2016).
3. Бушуєв Ф.И., Калюжний Н.А., Сливинский А.П., Шульга А.В. Определение дальности до телекоммуникационных геостационарных спутников с использованием сигналов спутникового телевидения. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. № 3. С. 281–290.
4. Бушуєв Ф.И., Калюжний Н.А., Сибірякова Є.С., Шульга А.В., Горбанёв Ю.М. Метод и первые результаты определения разности наклонных дальностей до телекоммуникационных геостационарных спутников. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. № 3. С. 238–246.
5. *EIGEN-6 – A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse*. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-3242-2.pdf> (Last accessed: Dec. 05, 2016).
6. *Passive Ranging for Geostationary Satellites: On a Novel System and Operational Benefits*. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2014-1857> (Last accessed: Dec. 05, 2016).

### REFERENCES

1. Bushuev F.I., Kalyuzhny N.A., Shulga A.V., Slivinsky A.P. *Using signals of satellite television to determine the distance to telecommunications geostationary satellites*. The Abstract Book of the International Conference «Astronomical Research: From Near-Earth Space to the Galaxy». Mykolaiv, Ukraine, 2011: 13–14.
2. *Passive correlation ranging (PaCoRa)* [online]. Available from <https://artes.esa.int/projects/passive-correlation-ranging-pacora>.
3. Bushuev F.I., Kalyuzhny N.A., Slivinsky A.P., and Shulga A.V. Determination of the Range to Geostationary Telecommunications Geostationary Satellites Using the Signals of Satellite Television. *Radiofizika i Radioastronomija*. 2012. 17(3): 281–290 [in Russian].



4. Bushuev F.I., Kaliuzhnyi M.P., Sybiryakova Ye.S., Shulga O.V., Gorbanev Yu.M. Method and first results of calculation of slant-range differences to active geostationary telecommunication satellite. *Radiofizika i Radioastronomija*. 2015. 20(3): 238–246 [in Russian].
5. EIGEN-6 — A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse [online]. Available from <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-3242-2.pdf>.
6. *Passive Ranging for Geostationary Satellites: On a Novel System and Operational Benefits* [online]. Available from <https://artes.esa.int/projects/passive-correlation-ranging-pacora>.

M.P. Kaliuzhnyi<sup>1</sup>, F.I. Bushuev<sup>1</sup>, Ye.S. Sibiriakova<sup>1</sup>, O.V. Shulga<sup>1</sup>, L.S. Shakun<sup>2</sup>, V. Bezrukov<sup>3</sup>, V.F. Kulishenko<sup>4</sup>, S.S. Moskalenko<sup>5</sup>, Ye.V. Malynovskiy<sup>6</sup>, O.A. Balagura<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Research Institute «Mykolaiv Astronomical Observatory», 1, Observatorna Str., Mykolaiv, 54030, Ukraine, tel. +38 (0512) 47-70-14

<sup>2</sup>Research Institute «Astronomical Observatory» of the Mechnikov Odesa National University, 1V, Marazliyivska St., Odesa, 65014, Ukraine, +38 (048) 722-03-96

<sup>3</sup>Ventspils University College, 101, Inzenieru St., Ventspils, LV-3601, Latvia, +37163629657

<sup>4</sup>Institute of Radio Astronomy, the NAS of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine, +38 (057) 706-14-15

<sup>5</sup>Western Center of Radio Engineering Surveillance, Kosmonavtiv St., Mukacheve, 89612, Ukraine, +38 (0313) 12-33-16

<sup>6</sup>Rivne Minor Academy of Sciences of School Age Youth, 17, Symona Petlyury St., Rivne, 33013, Ukraine, +38 (0362) 26-69-89

<sup>7</sup>State Enterprise «Ukrkosmos», 9, Boryspilska St., Kyiv, 02099, Ukraine, +38 (044) 369-51-52

#### MONITORING OF THE ORBITAL POSITION OF A GEOSTATIONARY SATELLITE BY THE SPATIALLY SEPARATED RECEPTION OF SIGNALS OF DIGITAL SATELLITE TELEVISION

The results of the determination of the geostationary satellite «Eutelsat-13B» orbital position obtained during 2015–2016 years using European stations' network for reception of DVB-S signals from the satellite are presented. The network consists of five stations located in Ukraine and Latvia. The stations are equipped with a radio engineering complex developed by the RI «MAO». The measured parameter is a time difference of arrival (TDOA) of the DVB-S signals to the stations of the network. The errors of TDOA determination and satellite coordinates, obtained using a numerical model of satellite motion, are equal  $\pm 2.6$  m and  $\pm 35$  m respectively. Software implementation of the numerical model is taken from the free space dynamics library OREKIT.

*Keywords:* orbit of geostationary satellite, DVB-S, TDOA, radio interferometer.

H.A. Kалужный<sup>1</sup>, Ф.И. Бушув<sup>1</sup>, Е.С. Сибирякова<sup>1</sup>, А.В. Шулга<sup>1</sup>, Л.С. Шакун<sup>2</sup>, В. Безруков<sup>3</sup>, В.Ф. Кулишенко<sup>4</sup>, С.С. Москаленко<sup>5</sup>, Е.В. Малиновский<sup>6</sup>, О.А. Балагура<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ «НАО»), ул. Обсерваторная, 1, Николаев, 54032, Украина, +38 (0512) 47-70-14

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова (НИИ «АО» ОНУ), ул. Маразлиевская, 1В, Одесса, 65014, Украина, +38 (048) 722-03-96

<sup>3</sup>Вентспилская высшая школа, ул. Инженерная, 101, Вентспилс, LV-3601, Латвия, +37163629657

<sup>4</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины, ул. Червонопрапорная, 4, Харьков, 61002, Украина, +38 (057) 706-14-15

<sup>5</sup>Западный центр радиотехнического наблюдения, ул. Космонавтов, Мукачево, 89612, Украина, +38 (0313) 12-33-16

<sup>6</sup>Ровенская Малая академия наук ученической молодежи, ул. Симона Петлюры, 17, Ровно, 33013, Украина, +38 (0362) 26-69-89

<sup>7</sup>Государственное предприятие «Укркосмос», ул. Бориспольская, 9, Киев, 02099, Украина, +38 (044) 369-51-52

#### МОНІТОРИНГ ОРБІТАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ГЕОСТАЦІОНАРНОГО СПУТНИКА МЕТОДОМ БАЗИСНОГО ПРИЄМА СИГНАЛІВ ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВІДЕННЯ

Приведены результаты определения орбитального положения геостационарного спутника «Eutelsat-13B», полученные в течение 2015–2016 гг. с помощью европейской сети станций приема сигналов DVB-S, излучаемых спутником. В состав сети входят пять станций, расположенных в Украине и Латвии. Станции оснащены радиотехническим комплексом, разработанным в НИИ «НАО». Измеряемым параметром является разность времени прихода сигнала DVB-S на станции сети или TDOA (Time Difference Of Arrival). Ошибка определения TDOA и координат спутника, которые были получены с использованием численной модели движения спутника, равняются  $\pm 2,6$  м и  $\pm 35$  м соответственно. Программная реализация численной модели была взята из астродинамической библиотеки OREKIT с открытыми кодами.

*Ключевые слова:* орбита геостационарного спутника, DVB-S, TDOA, радиоинтерферометр.

Статья надійшла до редакції 21.10.16