

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Калюжний Микола Панасович**

УДК 521.9+521.98

**ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ  
РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ  
ЕЛЕМЕНТІВ ОРБИТ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ**

01.03.01 Астрометрія і небесна механіка

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Шульга Олександр Васильович**,  
Науково дослідний інститут  
«Миколаївська астрономічна обсерваторія»,  
директор

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор,  
**Зазуляк Петро Михайлович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри картографії і геопросторового  
моделювання;

кандидат фізико-математичних наук,  
**Іщенко Марина Вікторівна**,  
Головна астрономічна обсерваторія НАНУ,  
науковий співробітник відділу астрометрії та космічної  
геодинаміки.

Захист відбудеться 27 червня 2017 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.13 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус №3, ауд. 506, кафедра аерокосмічної геодезії.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного авіаційного університету України за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус № 8.

Автореферат розісланий 27 травня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради К 26.062.13  
кандидат фіз.-мат. наук, доцент

Л.С. Чубко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Унікальні властивості геостаціонарних орбіт обумовлюють надзвичайно важливе значення супутників на цих орбітах, так як вони забезпечують безперервний зв'язок і постійне спостереження за територією. В останні два десятиріччя на геостаціонарних орбітах розміщуються також елементи регіональних супутникових систем диференційної корекції (Space-Based Augmentation Systems, скорочено SBAS), призначених для підвищення точності глобальних систем позиціонування, таких як GPS (Global Positioning System) та інших. Одним із призначень SBAS є забезпечення безпеки польотів. Відповідні системи впроваджені або плануються для впровадження в США, Євросоюзі, Японії, Китаї, Індії та в інших країнах, включаючи Україну. Спостерігається, таким чином, постійне зростання населеності геостаціонарного поясу, при тому, що розміри геостаціонарної комірки зменшуються і на сьогодні складають  $\sim 0.1^\circ$ , що на орбіті відповідає близько 60 км. Загальною тенденцією є також розміщення декількох супутників в одній геостаціонарній комірці (co-location). В даний час в одній комірці можуть розміщатися шість і більше супутників. Гостроту проблеми збільшує засміченість геостаціонарної зони антропогенними об'єктами, які не функціонують, але знаходяться на навколоземних орбітах.

Працюючі телекомунікаційні геостаціонарні супутники (ТК ГСС) являються особливими об'єктами навколоземного простору. В даний час ТК ГСС розміщені в 185 геостаціонарних комірках. Розміщення двох, трьох, а то і чотирьох ТК ГСС в одній комірці над густонаселеними районами земної поверхні є розповсюдженою практикою. Таке тісне розміщення потребує безперервного контролю орбітального положення ТК ГСС.

Найбільш поширеними засобами такого контролю є однопозиційні радари дистанціонування та супроводу по азимуту і куту місця. Похибка визначення кутових координат радаром, що має антену з діаметром 10 метрів і працює на частоті 14 ГГц, становить  $10''$ , тоді як похибка кодового дистанціонування може бути декілька сантиметрів. В зв'язку з ростом щільності розміщення супутників на геостаціонарних орбітах, існує потреба, по-перше, підвищення точності орбітального супроводу і, по-друге, зменшення рівня електромагнітного опромінювання супутників. В Європейському космічному агентстві (ЄКА) в якості низько бюджетної і високоточної альтернативи активним радарам дистанціонування розглядається система повністю пасивної радіолокації геостаціонарних супутників PaCoRa (Passive Correlation Ranging). Відповідний проект ЄКА був виконаний корпорацією SES (Société Européenne des Satellites) протягом 2010-2013

років. В даний час корпорація SES спільно з Fraunhofer Research Institute впроваджують проект PaCoRa в США. Базовим принципом функціонування системи PaCoRa є використання кореляційного аналізу для обчислення TDOA (Time Difference Of Arrival) — різниці в часі прийому рознесеними у просторі терміналами (станціями) сигналів, випромінюваних супутниками. Тобто, систему PaCoRa можна вважати однією із реалізацій радіоінтерферометра. В результаті моделювання, автори проекту показали, що система PaCoRa із чотирьох рознесених у просторі станцій повинна мати максимальну похибку обчислення координат геостаціонарного супутника приблизно рівну 119 м, що майже на порядок менше відповідної похибки однопозиційного радара дистанціювання. Слід зауважити, що сигнали цифрового супутникового телебачення, які випромінюються ТК ГСС, добре підходять в якості маяка для такого радіоінтерферометра, так як являються широкосмуговими і псевдошумовими, тобто мають вузьку функцію автокореляції.

Важливою перевагою даного радіоінтерферометричного методу є те, що з його допомогою можна супроводжувати довільний ТК ГСС. Потрібно лише розташувати станції радіоінтерферометрів в зоні покриття відповідного супутника. Для обчислення збуреної орбіти ТК ГСС мережа радіоінтерферометрів повинна складатися з чотирьох і більше станцій. Тому актуальною є науково-технічна задача створення мережі радіоінтерферометрів для безперервного контролю орбітального положення ТК ГСС та розробка методів обчислення елементів орбіти супутників за даними вимірювань TDOA. Створення мережі радіоінтерферометрів може бути доцільною з огляду забезпечення незалежного орбітального супроводу майбутнього українського ТК ГСС «Либідь».

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є складовою частиною двох фундаментальних робіт Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ «МАО»), участь у виконанні яких брав здобувач:

Тема «ФАВОР» – Дослідження динаміки орбітального руху об'єктів навколоземного космічного простору за результатами спостережень наземними оптичними та радіотехнічними засобами. 2011–2013 рр., №0111U000084.

Тема «ОКО» – Визначення та уточнення орбітальних параметрів штучних об'єктів навколоземного космічного простору за наземними оптичними та радіотехнічними спостереженнями. 2014–2016 рр., №0114U003049.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження полягає в безперервному контролі орбітальних параметрів ТК ГСС за результатами

позиційних спостережень, які проводяться радіоінтерферометричним методом.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Розробити та впровадити метод оцінки TDOA на основі кореляційного аналізу сигналів цифрового супутникового телебачення DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite), які складають корисне навантаження транспортного потоку, що випромінюється контрольованим ТК ГСС і які приймаються станціями радіоінтерферометричної мережі, рознесеними по поверхні Землі.

2. Розробити та впровадити оригінальне програмне забезпечення для розрахунку елементів орбіти ТК ГСС за даними вимірювань TDOA, отриманими протягом доби.

3. Організувати та забезпечити функціонування радіоінтерферометричної мережі для визначення параметрів орбіти ТК ГСС.

4. Реалізувати методи віддаленого доступу в режимі «online» до комп'ютерів радіоінтерферометричної мережі з метою контролю функціонування та оперативного отримання даних спостережень.

*Об'єкт дослідження.* Телекомунікаційні геостационарні супутники.

*Предмет дослідження.* Елементи орбіти ТК ГСС.

*Методи досліджень.* Для підвищення в 5–10 разів точності розрахунку елементів орбіти ТК ГСС використано радіоінтерферометричний метод спостереження контрольованого супутника. Метод базується на кореляційному обчисленні відносних затримок (TDOA) сигналів цифрового супутникового телебачення, синхронно отриманих мережею приймальних станцій, встановлених у містах Харків, Мукачеве, Рівне, Миколаїв (Україна) і Вентспілс (Латвія). Для обчислення елементів орбіти застосовувалася аналітична модель руху супутника SGP4/SDP4 та модель руху, яка базується на чисельному інтегруванні рівнянь руху з врахуванням геопотенціалу несферичної Землі і збурень, обумовлених впливом Місяця і Сонця. Моделі програмно реалізовані в НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету (НДІ «АО» ОНУ).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Під час виконання роботи отримано наступні нові результати:

1. Вперше реалізовано спосіб визначення положення ТК ГСС безпосередньо за сигналами цифрового супутникового телебачення, які вони випромінюють. Спосіб ґрунтується на застосуванні радіоінтерферометричного методу та методу пасивної радіолокації для визначення різниці затримок телевізійних сигналів, які синхронно приймаються географічно рознесеними станціями прийому супутникового

телебачення. Різниця затримок (TDOA) визначається в результаті кореляційного аналізу сигналів, прийнятих станціями.

2. Вперше для безперервного контролю орбітального положення ТК ГСС у відповідності з запропонованим методом організовано та забезпечено функціонування радіоінтерферометричної мережі із п'яти географічно рознесених станцій прийому сигналів цифрового супутникового телебачення.

3. Вперше проводиться щодобове визначення параметрів орбіти контрольованого ТК ГСС за даними вимірювання значень TDOA сигналів цифрового супутникового телебачення радіоінтерферометричною мережею у складі із п'яти географічно рознесених станцій. СКП визначення координат супутника не перевищує 225 м на епоху обчислення елементів орбіти.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

Представлену в роботі експериментальну радіоінтерферометричну мережу можна розглядати в якості прототипу системи безперервного супроводу національного ТК ГСС «Либідь», комерційних супутників інших операторів і геодезичної мережі вимірювання відстані між точками на поверхні Землі та вивчення тропосферних і іоносферних збурень.

#### **Достовірність і обґрунтованість результатів.**

Достовірність даних і їх обґрунтованість базуються на ретельному аналізі випадкових та систематичних похибок спостережень.

Проведено зовнішнє порівняння результатів спостережень з даними оптичних спостережень, виконаних в НДІ «МАО», а також з ефемеридами контрольованого супутника з відкритого каталогу космічних об'єктів, що ведеться США і розміщеному на сайті [www.space-track.org](http://www.space-track.org).

Співставлення значень TDOA, отриманих за даними вимірювань радіоінтерферометричною мережею, з TDOA, обчисленими з використанням елементів орбіти, розрахованими по оптичним вимірюванням, показало, що СКП різниці TDOA не перевищує 3 м, а середнє значення різниці знаходиться в межах  $\pm 32$  м на епоху проведення вимірювань. Відповідні величини СКП і середнього, отримані для різниці TDOA з використанням ефемерид з сайту [www.space-track.org](http://www.space-track.org), дорівнюють  $\pm 40$  м і  $\pm 10$  м.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Всі результати, що представлені в дисертації, отримані особисто дисертантом або за його безпосередньою участю. Автор приймав участь у виконанні робіт, аналізі та інтерпретації приведених у дисертації результатів.

Безпосередньо особистий внесок автора в друкованих роботах наступний: [1] – автор приймав участь у проведенні спостережень, у

обговоренні результатів, також автором написана друга глава в частині, що стосується програмного забезпечення радіотехнічного комплексу, автором самостійно написана третя глава; [2] – автор приймав участь у проведенні спостережень, автором самостійно написана перша та друга глави, а також третя глава в частині визначення діючої частоти дискретизації цифрового USB-осцилографа; [3] – автор приймав участь у проведенні спостережень, автором самостійно написана друга глава та виконана оцінка точності; [4] – автор приймав участь у проведенні спостережень, самостійно написані перша, друга та четверта глави; [5] – автор приймав участь у проведенні спостережень, самостійно написані вступ, перша і друга глави, а також виконані обчислення значень TDOA як за даними спостережень, так і з використанням двох моделей руху супутника.

[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] – автор приймав участь в отриманні та обговоренні результатів, самостійно написані тексти повідомлень [6], [11] і [13]; авторські свідоцтва [14, 15] отримані автором самостійно, заява про видачу патенту [16] написана автором в частині опису корисної моделі та аналогів.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати, що увійшли до дисертації, представлялись та доповідались на:

1. International Conference “Astronomical Research: From Near-Earth Space to the Galaxy” (м. Миколаїв, 26-29 вересня 2011 р.).
2. IV Международном специализированном симпозиумі «Космос и глобальная безопасность человечества» (м. Євпаторія, 3-7 вересня 2012 р.).
3. «International meeting on variable stars research Kolos 2012» (м. Стакін, Словаччина, 6–8 грудня 2012 р.).
4. «Щорічна робоча нарада Української мережі лазерної локації та української мережі оптичних станцій (УМОС)» (м. Миколаїв, 29-30 жовтня 2013.).
5. 4th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing” (м. Вентспілс, Латвія, 20-21 серпня 2015 р.).
6. 15-а Українська конференція з космічних досліджень (м. Одеса, 24-28 серпня 2015.).
7. 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology” (м. Одеса, 14-20 серпня 2016.).
8. International Conference “Actual Questions of Ground-Based Observational Astronomy” (м. Миколаїв, 26-29 вересня 2016 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 5 фахових виданнях [1–5], а також в 9 матеріалах конференцій [6–13], в двох авторських свідоцтвах на програмний продукт [14-15], та в одній заяві про видачу патенту [16].

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку цитованої літератури (98 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 134 сторінки. Дисертація містить 32 рисунки, 6 таблиць і 4 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито актуальність теми досліджень, визначено предмет досліджень і зв'язок з науковими програмами і темами науково-дослідних робіт НДІ «МАО», сформульовано мету роботи і визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок дисертанта, приведено список публікацій автора, на яких базується представлена дисертаційна робота.

**Розділ 1** містить огляд літератури за тематикою дисертації, в якому стисло розглянуто проблеми визначення положення геостаціонарних супутників радіотехнічними засобами.

Найбільш поширеним радіотехнічним засобом супроводу геостаціонарних супутників є однопозиційний радар, який має вузько направлену антену, призначену для супроводу супутника по азимуту та куту місця та систему тонового або кодового дистанціювання, призначену для визначення дальності. Результиуюча похибка визначення координат обумовлюється похибкою обчислення кутових координат і для геостаціонарних супутників становить близько декількох кілометрів. Висока точність визначення дальності (приблизно декілька сантиметрів) не може бути використана ефективно, так як геостаціонарний супутник практично не рухається відносно точки на поверхні Землі.

Для зменшення похибки визначення радаром кутових координат геостаціонарних супутників іспанська компанія CRISA при підтримці ЄКА розробила радіоінтерферометр з базою 250 метрів. Ця незначна відстань між антенами дозволила використовувати в радіоприймачах інтерферометра спільний гетеродин, а також дозволила зменшити фазові похибки за рахунок використання охолоджених оптоволоконних ліній для передачі радіосигналів з виходів антен на входи змішувачів. Похибка визначення кутових координат цим радіоінтерферометром на частоті 13 ГГц склала близько 1", що на порядок менше ніж у традиційного радара.



Поширеною практикою підвищення точності є використання двох і більше радарів дистанціювання, рознесених у просторі. Система дистанціювання DARTS (Digital Advanced Ranging with Transport-stream Signals) розроблялась компанією SES Astra і Інститутом інтегральних схем ім. Фраунгофера для роботи як в однопозиційному режимі, так і в режимі з декількома рознесеними у просторі станціями. В останньому випадку одна з станцій DARTS повинна бути суміщена з передавачем корисного навантаження супутника. Ця станція визначає момент випромінювання пакету дистанціювання та передає його на інші станції системи. Похибка дистанціювання складає 5 см. Синхронізація всієї системи виконується за допомогою GPS. Саме похибки синхронізації обумовили результуючу похибку системи, яка виявилась не меншою, ніж у однопозиційного радара. Особливістю системи є відсутність додаткового опромінення супутника, так як пакет дистанціювання вставляється в транспортний потік DVB-S корисного навантаження, а для визначення моменту приходу пакета використовується згортка прийнятого і випроміненого сигналів.

Розроблена корпорацією SES система повністю пасивної радіолокації геостаціонарних супутників PaCoRa розглядається в якості низькобюджетної і високоточної альтернативи радарам дистанціювання. Повідомляється, що система PaCoRa у складі з двох терміналів випробувалась протягом двох діб у березні 2014 року одночасно з радаром тонового дистанціювання. Синхронізація терміналів PaCoRa здійснювалася за допомогою GPS. Були отримані похибки визначення різниці нахилених відстаней  $\Delta r = c \cdot \Delta t$  і  $R$ , де  $c$  — швидкість світла,  $\Delta t$  — значення TDOA, а  $R$  — відстань до супутника виміряна радаром. Ці похибки співпали і дорівнювали приблизно 2 метри. Максимальні похибки обчислення координат супутника двома системами, отримані в результаті моделювання, суттєво відрізнялися і дорівнювали 119 м і 1008 м відповідно для системи PaCoRa і для радара дистанціювання. Нажаль, крім місць дислокації чотирьох терміналів PaCoRa та радара інші параметри моделей не повідомляються.

Слід зазначити, що мережі радіоінтерферометрів з наддовгими базами (РНДБ), як і традиційні оптичні засоби та засоби лазерної локації, використовуються для калібрування радіотехнічних систем. Наприклад, китайська мережа РНДБ із чотирьох станцій була використана для калібрування засобів контролю положення геостаціонарних супутників, які належать до другого покоління китайської супутникової навігаційної системи BeiDou, відомої також як COMPASS або BeiDou-2. Для маяка з шириною спектра 2 МГц похибка визначення координат супутників становила приблизно 10 метрів, тоді як похибка  $\Delta r$  дорівнювала  $\sim 1$  м.

**Розділ 2. Визначення орбітального положення ТК ГСС по радіоінтерферометричним вимірюванням.** Розроблений та впроваджений автором у співпраці з колегами підхід до вирішення завдання визначення положення ТК ГСС ґрунтується на кореляційному аналізі сигналів цифрового супутникового телебачення DVB-S, які складають корисне навантаження транспортного потоку, що випромінюється контрольованим ТК ГСС і які приймаються рознесеними у просторі приймачами (станціями). В результаті кореляційного аналізу обчислюються різниці в часі прийому цих сигналів парами станцій — величини TDOA. У цьому відношенні запропонований підхід еквівалентний вживаному в радіоінтерферометрії, при якому в результаті кореляційного аналізу прийнятих радіоінтерферометром радіосигналів визначаються просторові характеристики джерела цих радіосигналів. Істотна відмінність полягає в вимогах, які пред'являються до приймачів. В класичних РНДБ висуваються жорсткі вимоги до стабільності і ідентичності амплітудно-фазових характеристик. В приймачах цифрового супутникового телебачення таких жорстких вимог на має, не дивлячись на те, що для передачі цифрового потоку використовується значення фази радіосигналу. В даний час в супутниковому телебаченні використовується два стандарти передачі інформації: DVB-S і DVB-S2. В обох випадках фаза радіосигналу на виході приймача повинна співпадати з фазою випроміненого сигналу, так як саме від її величини залежить значення прийнятого символу. Тобто, сигнали в приймачах DVB-S(S2) детектуються когерентно. Крім того, інформація в телебаченні передається синхронно. Отже, для функціонування системи цифрового супутникового телебачення потрібно забезпечити тактову синхронізацію і відновлення несучої. Для відновлення несучої і, відповідно, фази вихідного сигналу в приймачах DVB-S(S2) використовується петля автоматичного підстроювання фази, коли фаза гетеродину змінюється таким чином, щоб компенсувати додаткові набіги фази, індивідуальні для кожного приймача і забезпечити тактову синхронізацію, яку називають синхронізацією символів: відповідність вихідної послідовності символів відомій інформаційній структурі транспортного потоку. Таким чином, використання системи автоматичного відновлення фази випроміненого сигналу, значно спрощує апаратну реалізацію та експлуатацію приймачів супутникового телебачення.

Особливість нашого підходу полягає в тому, що синхронне (по GPS) оцифрування сигналу DVB-S виконується в приймачах мережі зовнішніми аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) поза петлями автопідстроювання фази і не синхронно з роботою внутрішніх АЦП приймачів. Це приводить до того, що на виході зовнішнього АЦП в

дискретні моменти часу  $t_j$  значення фази  $\psi_j$  прийнятого комплексного сигналу містять додаткові фазові зсуви, індивідуальні для кожного приймача. Однак, враховуючи вид модуляції сигналів DVB-S(S2), можна очікувати, що різниця двох сусідніх відліків фази ( $\psi_j - \psi_{j-1}$ ), обчислена для одного і того ж фрагменту сигналу, що передається, буде однаковою або близькою незалежно від приймача. Відповідно, будуть однакові або близькими значення функції  $F(t_j)$ :

$$F(t_j) = A_j \cdot \sin(\psi_j - \psi_{j-1}), \quad (1)$$

де  $A_j$  — вибіркове значення амплітуди комплексного сигналу в момент часу  $t_j$ . Застосування перетворення  $F(t_j)$  дозволило отримати на частоті дискретизації Найквіста згортку сигналів з відношенням сигнал/шум на виході корелятора порядку 5-10, при цьому початкові комплекси сигнали не згортаються. Такий підхід дозволив в якості приймачів використовувати побутові приймачі супутникового телебачення, а в якості АЦП — недорогі цифрові USB-осцилографи, у яких вибірка сигналу не залежить від частоти дискретизації і дорівнює  $N_s = 10240$ . При цьому значення номінальної частоти дискретизації АЦП осцилографа дорівнює:

$$f_n = \frac{N_s}{T_s} \quad (2)$$

де  $T_s$  — тривалість вибірки або шкала осцилографа.

При обчисленні кореляційної функції вибірка значень перетворення  $F$ , отримана одним з приймачів, використовується повністю (перша вибірка), а вибірка, отримана другим приймачем, використовується частково, лише середня частина заданої довжини, зміщена на час  $\tau_2 = \frac{n}{f_n} \geq 0$  від її початку

(друга вибірка або вибірка корелятора). У виразі для  $\tau_2$  значення  $n$  є безрозмірною величиною, яка дорівнює зміщенню вибірки у відліках частоти дискретизації. Обсяг першої вибірки фіксований і дорівнює  $N_s$ .

Обсяг другої вибірки – завжди менший ніж  $N_s$ . Нехай  $\tau_x = \frac{n_x}{f_n}$  – часовий зсув

максимуму кореляційної функції, що відраховується від початку першої вибірки, а  $n_x$  — зміщення максимуму в відліках частоти дискретизації. Для обчислення кореляційної функції використовується швидке перетворення Фур'є, а для уточнення положення її максимуму і відповідно для збільшення точності визначення  $n_x$  використовується перетворення Гільберта кореляційної функції. В результаті цього уточнення значення  $n_x$  може бути не цілим, тоді як  $n$  завжди ціле число. Для уточнення  $n_x$  використовується також інтерполяція первинного сигналу в припущенні, що спектр сигналу на частотах більших за частоту Найквіста дорівнює нулю.

Ширина спектру сигналу DVB-S, який використовується в якості маяка при супроводі ТК ГСС, дорівнювала приблизно 30 МГц. Найближче значення шкали осцилографа  $T_s$ , яке відповідає, згідно з виразом (2), значенню  $f_n$ , не меншому за частоту дискретизації Найквіста, дорівнює 200 мкс. Отримане значення  $T_s$  визначає приладове обмеження для можливих величин TDOA. В дійсності, середнє значення  $\Delta\tau$  залежить від довжини базової лінії, що з'єднує станції, а також від взаємного розташування контрольованого супутника і базової лінії і може бути порядку декількох мілісекунд. Варіації TDOA відносно середнього значення залежать від зміщення супутника в межах геостаціонарної комірки і не можуть бути більшими за 20 мкс. Для усунення приладового обмеження на можливі значення  $\Delta\tau$  використовується компенсація середнього значення TDOA за допомогою завдання індивідуальних початкових затримок  $\tau_{PPS}$  секундних синхроімпульсів PPS (Pulse-Per-Second), які формуються приймачами GPS кожної станції мережі.

Отже, з урахуванням вищевикладеного маємо наступне розрахункове співвідношення для TDOA:

$$\Delta\tau_{ki} = \left( \frac{n_{xi}}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSi} \right) - \left( \frac{n_k}{k_{sr} \cdot f_n} + \tau_{PPSk} \right) - \Delta\tau_{hki}. \quad (3)$$

В наведеному виразі індекси  $i$  і  $k$  ( $i > k$ ) являються умовними номерами станцій мережі, вибірки яких, відповідно, беруться у якості першої і другої. Параметр  $\Delta\tau_{hki}$  дорівнює вимірюваному значенню апаратних затримок пари станцій з індексами  $k$  і  $i$ , а значення  $k_{sr}$  також отримується в результаті вимірювань і дорівнює коефіцієнту пропорційності між діючою частотою дискретизації ( $f_v$ ) і номінальною:

$$f_v = k_{sr} \cdot f_n. \quad (4)$$

Орбіта ТК ГСС визначається за добовими масивами виміряних значень TDOA із застосуванням двох моделей руху супутника: аналітичної моделі SGP4/SDP4 (Simplified General Perturbation / Simplified Deep Space Perturbation) і чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника. За допомогою моделі SGP4/SDP4 обчислюються псевдо-кеплерові елементи орбіти супутника в так званому TLE (Two-Line Elements) форматі, запропонованому NORAD (North American Aerospace Defense Command). Визначення орбіти за допомогою чисельної моделі здійснюється з урахуванням збурень, викликаних гравітаційним тяжінням Сонця і Місяця (JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE405/DE406) та гравітаційним тяжінням несферичної Землі (модель EIGEN-6S, взята з точність до 9 степені і порядку). Для обчислення положень супутника у відповідності з зазначеними моделями використовується астродинамічна бібліотека

OREKIT (ORbit Extrapolation KIT) з відкритим сирцевим кодом. Орбітальні параметри розраховуються методом найменших квадратів (МНК), а саме, мінімізацією суми квадратів різниць вимірних та модельних значень TDOA. Рішення системи рівнянь МНК визначаються методом Левенберга-Марквардта. Координати і швидкості супутника задаються в системі координат TEME (True Equator Mean Equinox) при обчисленні орбіти з використанням моделі SGP4/SDP4 і в системі координат EME2000 (Earth's Mean Equator and Equinox) – при використанні чисельної моделі. Система координат EME2000 також називається J2000.

**Розділ 3. Розробка та створення радіоінтерферометричної мережі моніторингу ТК ГСС.** В розділі подано інформацію про створення та модернізацію радіотехнічних засобів, які використовуються для контролю ТК ГСС.

З 2011 по 2016 рр. за участю автора в НДІ «МАО» було розроблено та введено в експлуатацію мережу моніторингу орбітального положення ТК ГСС радіоінтерферометричним методом. Перші успішні спостереження ТК ГСС були виконані в серпні 2011 року двома станціями, розташованими в с. Маяки на території філії НДІ «АО» ОНУ і в Миколаєві на території НДІ «МАО». Протягом двох діб спостерігався ТК ГСС «HotBird-9» (точка стояння  $13^{\circ}$  сд). Спостереження на регулярній основі почалися в 2013 році. В квітні та вересні-жовтні 2013 року протягом 50 діб спостерігався ТК ГСС «Eutelsat-25C» (точка стояння  $25.5^{\circ}$  сд) двома станціями, розташованими в Одесі на території НДІ «АО» ОНУ і в Миколаєві. У зв'язку із припиненням в жовтні 2013 року експлуатації супутника «Eutelsat-25C» станції комплексу були налаштовані на супровід ТК ГСС «Eutelsat-13B» (точка стояння  $13^{\circ}$  сд), який продовжувався 224 доби з 05.12.2013 до 16.07.2014 року. Спостереження супутника «Eutelsat-13B» були поновлені 22.10.2014 мережею у складі із чотирьох станцій, розташованих в містах Київ, Мукачеве, Харків і Миколаїв. В Києві станція була розташована на території державного підприємства «Укркосмос», в Мукачевому – на території Західного центру радіотехнічного спостереження і в Харкові – на території Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України. Слід зазначити, що з цього часу всі станції, крім миколаївської, були укомплектовані більш досконалим GPS-приймачем ThunderBolt-E замість Resolution-T. З 03.12.2014 миколаївська станція також була укомплектована GPS-приймачем ThunderBolt-E, що дозволило зменшити похибку визначення  $\Delta r$  з 4.5 м до 2.6 м. На початку вересня 2015 року до складу мережі увійшла станція, розташована в Вентспілсі на території Вентспільської вищої школи (Латвія). Регулярні спостереження п'ятьма станціями розпочалися 16.12.2015 року після відновлення роботи станції в Києві, яка припинила

спостереження 06.06.2015 у зв'язку із ремонтом будівлі, де вона розміщувалася. Однак, з 1 лютого 2016 року станція в Києві остаточно припинила роботу, але в березні 2016 року почала регулярні спостереження станція в Рівному, на території рівненської Малої академії наук учнівської молоді. На даний час станції мережі встановлені в містах Рівне, Мукачеве, Харків, Вентспілс та Миколаїв (рис. 1).



Рисунок 1 – Розміщення станцій мережі спостереження ТК ГСС.

Поряд з назвами міст дислокації на рисунку поміщені фотографії антен супутникового телебачення, які використовуються станціями. Найбільший діаметр антени, рівний 1.9 м, має станція в Миколаєві. Всі інші станції мають антени з діаметром близько 0.9 м. Максимальна відстань між станціями по широті і довготі складає приблизно 1000 км. Пунктом обчислення орбітальних параметрів є НДІ «МАО».

До складу кожної станції входять наступні складові: 1) стандартна антенно-фідерна система прийому сигналів супутникового телебачення; 2) приймач сигналів цифрового супутникового телебачення (SkyStar1 або SkyStar2), доопрацьований в частині виведення синфазного (In) і квадратурного сигналів (Qu) до цифрової обробки їх мікропроцесором приймача; 3) одночастотний GPS-приймач ThunderBolt-E; 4) цифровий USB-осцилограф DSO5200A із смугою пропускання 200 МГц і 9 бітним аналого-цифровим перетворювачем; 5) персональний комп'ютер (ПК) з портами USB і RS-232 під управлінням операційної системи Windows; 6) високошвидкісне підключення до Internet.

Блок-схему станції представлено на рис. 2. Відповідно до блок-схеми сигнали з виходу квадратурного детектора приймача подаються на два канали цифрового USB-осцилографа (Ch1 і Ch2). Запис у внутрішню пам'ять осцилографа реалізацій у часі цих сигналів (IQ), тривалістю  $T_s$ , виконується в момент надходження на клему зовнішнього запуску осцилографа (Ext) сигналу PPS від GPS-приймача ThunderBolt-E.

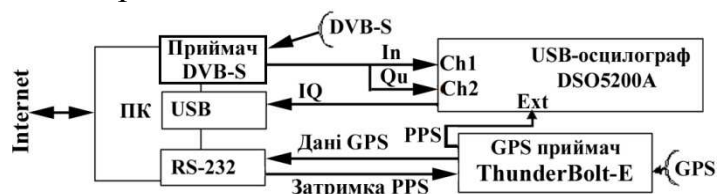


Рисунок 2 – Блок-схема станції.

Зчитування даних IQ з внутрішньої пам'яті осцилографа проводиться через порт USB відразу після надходження від GPS-приймача пакета даних з інформацією про поточний час («Дані GPS»). Момент початку видачі цієї інформації в порт RS-232 комп'ютера прив'язаний до моменту видачі сигналу PPS. Дані «Затримка PPS» містять команди управління GPS-приймачем, які задають потрібну затримку  $\tau_{PPS}$  синхроімпульсу PPS відносно початку секунди.

Програмне забезпечення (ПЗ) комп'ютерів станцій включає покупні і вільно поширювані програми і драйвера ТВ приймача, цифрового USB осцилографа, GPS-приймача, а також програми, розроблені автором для синхронного щосекундного читання даних IQ з осцилографа, їх первинної обробки, архівації і збереження на жорсткому диску комп'ютера. Контроль за функціонуванням комп'ютерів станцій здійснюється по мережі Internet за допомогою безкоштовної версії програми AnyDesk. Для оперативної передачі даних спостережень до пункту обчислення орбітальних параметрів використовується вільно розповсюджувана програма FTP клієнта FileZilla. В пункт обчислення орбітальних параметрів передаються нормовані значення перетворення (1), які безпосередньо використовуються при обчисленні кореляційної функції:

$$v(t_j) = \frac{F(t_j) - \bar{F}}{\sigma_F}, j = 0, \dots, N_s - 1,$$

де  $\bar{F}$  і  $\sigma_F$  — середнє та СКП  $F$ . Для зменшення об'єму інформації, що передається по мережі Internet, отримані нормовані значення  $F$  округляються до цілого з точністю до  $\lg(k_{round})$  знаків після коми і стискаються (без втрат) архіватором zip. В даний час  $k_{round} = 10$ . При цьому добовий об'єм інформації не перевищує 1 Гбайта. Перевірки показали, що округлювання даних не призводить до зміни оцінок TDOA. Зауважимо, що одночасно зі значеннями

перетворення  $F$  в пункт обчислення орбітальних параметрів передається наступна інформація: значення коефіцієнта  $k_{round}$ , поточні координати станцій, отримані за даними вимірювань GPS, а також задані затримки сигналу PPS відносно початку секунди.

Програмне забезпечення пункту обчислення орбітальних параметрів складається з програми оцінки TDOA, розробленої автором, та програми обчислення параметрів орбіти контрольованого ТК ГСС за даними вимірювань TDOA, розробленої в НДІ «АО» ОНУ.

**Розділ 4. Дослідження радіоінтерферометричної мережі моніторингу ТК ГСС.** Дослідження радіоінтерферометричної мережі станцій синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення проведено в умовах розташування станцій в одній точці («нульова» база) і в умовах, коли станції були рознесені у просторі («ненульова» база). В умовах з «нульовою» базою проводилося калібрування станцій, а в умовах «ненульової» бази були отримані оцінки TDOA для проведення зовнішнього порівняння з ефемеридами контрольованого супутника, обчисленими як за даними з відкритого каталогу космічних об'єктів розміщеного на сайті [www.space-track.org](http://www.space-track.org), так і за даними оптичних спостережень. В якості результатів спостережень розглядаються елементи орбіти контрольованих супутників, отримані за даними вимірювань TDOA.

**Калібрування станцій** включало: 1) оцінку мінімально можливої похибки визначення TDOA, 2) визначення діючої частоти дискретизації USB-осцилографа та 3) визначення апаратних затримок.

Оцінка мінімально можливої похибки визначення TDOA здійснювалась з використанням одного і того ж сигналу PPS для синхронного запису вибірок у внутрішню пам'ять осцилографів двох станцій, розташованих в одній точці. Під час вимірювання реєструвались вибірки сигналу DVB-S з шириною спектру 30 МГц і з номінальною частотою дискретизації 102.4 МГц. З урахуванням умов проведення вимірювань, отриману внутрішню похибку визначення TDOA з СКП= $\pm 7$  нс можна вважати граничною для апаратно-програмного комплексу станцій.

Для визначення діючої частоти дискретизації за допомогою осцилографа, що досліджувався, проводилися виміри затримки сигналу PPS одного GPS-приймача відносно сигналу PPS другого GPS-приймача при умові, що задані затримки цих сигналів  $\tau_{PPS}$  суттєво відрізняються (90 мкс і більше). В результаті вимірювань було отримано значення коефіцієнта пропорційності  $k_{sr}=0.97655$  між діючою частотою дискретизації і номінальною в виразі (4). Виміри показали, що отримане значення  $k_{sr}$  можна вважати константою для даного типу осцилографа DSO5200A.



Визначення апаратних затримок  $\Delta\tau_{hki} = \tau_{hi} - \tau_{hk}$  для довільних станцій  $i$  і  $k$  проводилося в припущенні, що значення абсолютних апаратних затримок станцій  $\tau_{hk}$  і  $\tau_{hi}$  є постійними для незмінного складу апаратно-програмного комплексу станцій. Враховуючи лінійну залежність  $\Delta\tau_{hki}$  від  $\tau_{hk}$  і  $\tau_{hi}$  достатньо провести вимірювання  $\Delta\tau_{hki}$  відносно однієї із станцій. Такі вимірювання проводилися в Миколаєві перед відправкою кожної станції до місця постійної дислокації. Для визначення  $\Delta\tau_{hki}$  використовувалася процедура оцінки TDOA в результаті кореляційного аналізу сигналів супутникового телебачення, які приймалися досліджуваними станціями в умовах розташування в одній точці, коли відстань між їхніми антенами була приблизно 15 м, а також в умовах нульових значень затримок сигналів PPS. В таблиці 1 приводяться значення апаратної затримки  $\Delta\tau_{hki}$  помножені на швидкість світла, отримані відносно станції в Миколаєві ( $k=0$ ) і дійсні з 03.12.2014 р..

Таблиця 1. Значення апаратної затримки  $\Delta\tau_{hki}$  відносно станції в Миколаєві ( $k=0$ ) помножені на швидкість світла.

Станція	Харків	Мукачеве	Київ	Вентспілс	Рівне
$i$	1	2	3	4	5
$c \cdot \Delta\tau_{h0i}$ , м	13.9	-36.8	-9.7	-6.0	-9.7

Значення  $c \cdot \Delta\tau_{h0i}$  для станцій в Києві і Рівному співпадають, так як після припинення роботи апаратура київської станції була повністю переміщена в Рівне.

**Результати вимірювань TDOA** були отримані за допомогою мережі із двох, чотирьох та п'яти станцій. Були визначені масиви вимірних щосекундних значень TDOA, загальна тривалість яких на початок 2017 року була більшою 800 діб. Отримані щосекундні значення TDOA усереднювались протягом хвилини. Саме середні значення TDOA ( $\overline{\Delta\tau}$ ) використовувалися в подальшому для обчислення координат супутника і елементів його орбіти. В якості ілюстрації на рис. 3 наводяться графіки змінювання різниці нахилених відстаней  $\overline{\Delta r} = c \cdot \overline{\Delta\tau}$  від станцій мережі до ТК ГСС «Eutelsat-13B», отримані за спостереженнями чотирьох пар станцій Харків-Миколаїв, Мукачеве-Миколаїв, Рівне-Миколаїв і Вентспілс-Миколаїв в період часу з 18 травня по 16 серпня 2016 року.

Для визначення похибки вимірювання TDOA одночасно з  $\overline{\Delta\tau}$  обчислювалися також СКП  $\Delta\tau$ . За спостереженнями, отриманими протягом інтервалу часу з лютого 2015 року по лютий 2017 року, були визначені масиви значень СКП  $\Delta\tau$  окремо для кожної пари станцій мережі з різними

базовими лініями. Зазначимо, що при наявності одночасних спостережень супутника 3, 4 і 5 станціями мережі, маємо 3, 6 і 10 різних базових ліній і, відповідно, значень TDOA. Статистичний аналіз отриманих масивів СКП  $\Delta\tau$  показав, що значення медіан СКП величини  $\Delta\tau$  для різних базових ліній мережі приблизно рівні і становлять  $\pm 8.7$  нс або 2.6 м для вимірювань  $\Delta\tau$ . Зазначимо, що отримана похибка вимірювання TDOA обумовлена похибками синхронізації станцій мережі за допомогою GPS.

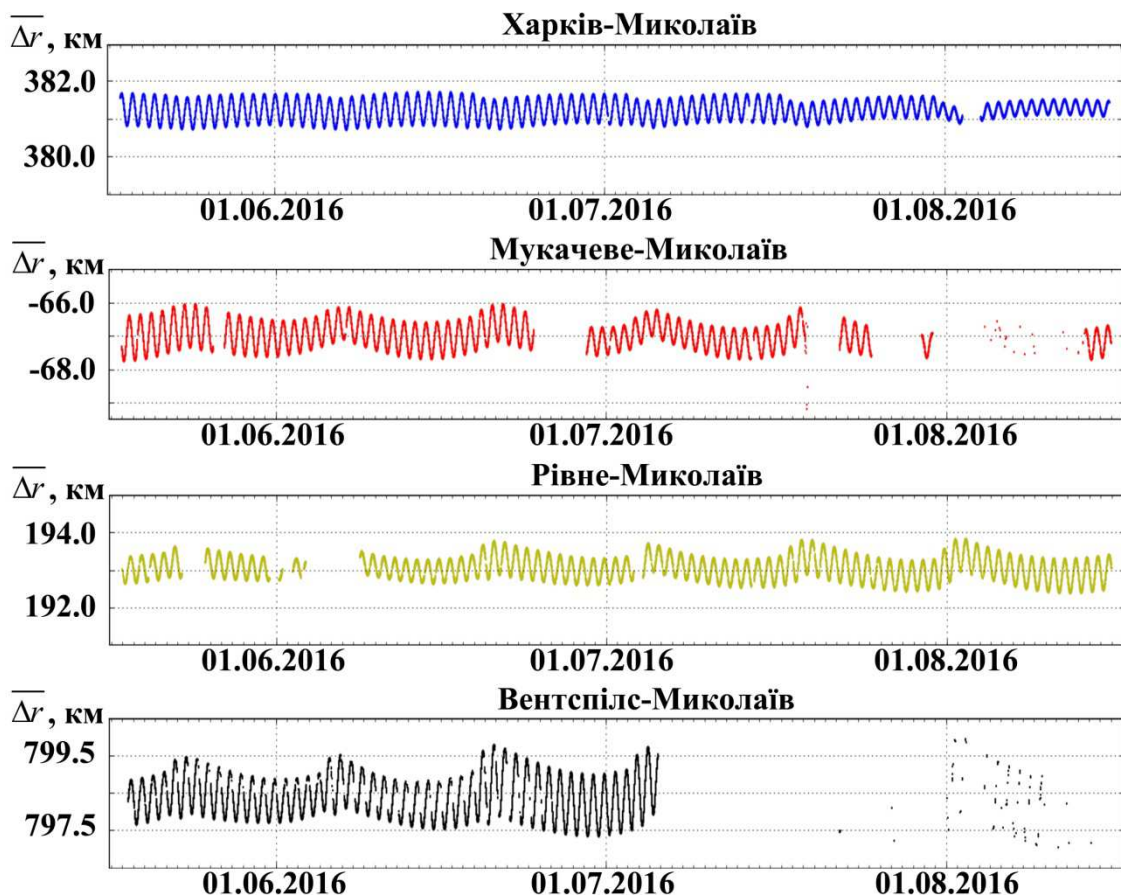


Рисунок 3 – Графіки змінювання у часі різниць нахилених відстаней  $\Delta r$  для чотирьох пар станцій (зверху вниз): Харків-Миколаїв, Мукачеве-Миколаїв, Рівне-Миколаїв та Вентспілс-Миколаїв. Період спостережень з 18 травня по 16 серпня 2016 року, час UTC.

**Визначення декартових координат супутника методом мультилатерації.** На рис. 4 представлені просторові положення супутника отримані в період часу з 11.03.2015 по 20.05.2015. Щосекундні значення декартових координат супутника  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  в системі координат WGS84 були обчислені методом мультилатерації. Наведені на рисунку координати супутника отримані усередненням секундних значень  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  протягом хвилини. Самі ж секундні значення  $X$ ,  $Y$  і  $Z$  визначалися по ковзаючим (з

кроком 1 секунда) значенням  $\overline{\Delta t}$ . СКП визначення координат  $X, Y, Z$ , відповідно, дорівнює  $\pm 3540$  м,  $\pm 705$  м і  $\pm 455$  м.

**Визначення елементів орбіти контрольованого супутника** здійснювалося по добовим масивам вимірних значень TDOA з використанням двох моделей руху супутника: аналітичної моделі SGP4/SDP4 і чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника.

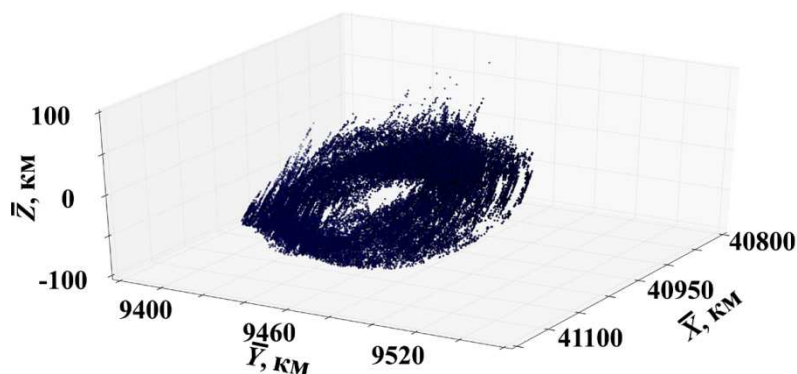


Рисунок 4 – Просторові положення супутника «Eutelsat-13B» отримані в період часу з 11.03.2015 по 20.05.2015 рр в системі координат WGS84.

Щодобові елементи орбіти контрольованого супутника «Eutelsat-13B» були визначені для періоду спостережень з лютого 2015 року по лютий 2017 – всього для 441 доби. При цьому елементи орбіти не визначалися, якщо протягом доби інтервал спостережень супутника не менше ніж трьома станціями був коротший 18 годин або кількість середніх відліків TDOA на добовому інтервалі спостережень, отриманих одночасно трьома і більше станціями мережі, була меншою 720. При обчисленні елементів орбіти враховувалися значення TDOA, отримані для всіх орієнтацій базових ліній мережі.

Отримані елементи орбіти використовувалися для обчислення модельних значень TDOA. Визначалися різниці  $\Delta$  між модельними і вимірюваними значеннями TDOA та обчислювалося середнє значення ( $\overline{\Delta}$ ) і СКП ( $\sigma_{\Delta}$ ) різниці  $\Delta$  на інтервалі підгонки. За отриманими масивами значень  $\overline{\Delta}$  і  $\sigma_{\Delta}$  були знайдені їхні медіани  $\hat{\Delta}$  і  $\hat{\sigma}_{\Delta}$  окремо для кожної моделі і кожної базової лінії. Для чисельної моделі випадкова складова  $\hat{\sigma}_{\Delta}$  в середньому в 5.4 рази менша, ніж для моделі SGP4/SDP4 і не перевищує 13.2 нс, тоді як регулярна складова  $\hat{\Delta}$  для обох моделей практично співпадає і знаходиться в інтервалі від  $-59.3$  нс до  $+44.8$  нс в залежності від базової лінії мережі. Із наведених даних витікає, що чисельна модель є більш точною, ніж модель SGP4/SDP4.

**Оцінка похибки визначення координат супутника при використанні елементів орбіти, які отримані за вимірними значеннями**

**TDOA.** Для оцінки похибки визначення координат контрольованого супутника були сформовані два масиви значень координат на дводобовому інтервалі часу, отримані для епох визначення елементів орбіти  $t_0$  і  $t_1$  ( $t_0 > t_1$ ) з різницею у часі рівною добі. При цьому моменти часу  $t_0$  і  $t_1$  відповідали серединам інтервалів підгонки, а інтервали підгонки в обох випадках дорівнювали 3 доби. Отримані два набори координат порівнювалися, визначалося середнє значення і СКП їхньої різниці, які розглядалися в якості шуканих оцінок регулярної та випадкової похибок визначення координат супутника. Оцінки похибок визначення координат супутника були проведені з використанням чисельної моделі інтегрування рівнянь руху супутника на інтервалі часу з 00:00:00 UTC 11 червня по 23:59:59 UTC 14 червня 2016 року, для якого значення TDOA змінюються плавно, тобто, ймовірність корекції орбіти була мінімальною. Результати оцінок похибки визначення радіальної (R), тангенціальної (T) і нормальної (N) координат супутника в локальній системі координат (Local Orbital Frame або LOF), отримані для мережі із двох (Вентспілс і Миколаїв) і чотирьох (Харків, Вентспілс, Рівне і Миколаїв) станцій наводяться в таблиці 2. Для порівняння в крайній справа колонці таблиці приводяться похибки мережі PaCoRa. Зазначимо, що локальна система координат R, T і N використовується в системах контролю положення супутника. Так для зміни нахилу орбіти до супутника прикладається імпульс реактивної тяги потрібного напрямку вздовж вісі N. Зміна довготи супутника і ексцентриситету його орбіти виконується імпульсом потрібного напрямку та тривалості вздовж вісі T.

Таблиця 2 – Результати оцінки похибок визначення координат супутника «Eutelsat-13B» при використанні елементів орбіти, отриманим по вимірним значенням TDOA та похибки мережі PaCoRa.

Координати		2 станції		4 станції		PaCoRa, м
		Середнє, м	СКП, м	Середнє, м	СКП, м	
LOF	R	+27	±7530	+3	±223	±4
	T	-21	±7020	0	±203	±119
	N	-7	±1830	0	±2	±10

Із даних, наведених в таблиці 2, випливає:

- оцінки як регулярних (середнє), так і випадкових (СКП) похибок обчислення координат контрольованого супутника радіоінтерферометричною мережею у складі з мінімальною кількістю станцій (дві) значно більші за похибки, отримані мережею із чотирьох станцій і по СКП знаходяться в інтервалі від ±1830 м до ±19000 м;

- максимальна оцінка похибки обчислення координат супутника в локальній системі координат R, T і N мережею у складі із чотирьох станцій не перевищують  $\pm 225$  м, що в 1.9 рази більше похибки мережі PaCoRa, яка складає  $\pm 119$  м і була отримана моделюванням;

- регулярна похибка визначення координат мережею із чотирьох станцій не перевищує  $\pm 3$  м.

**Результати зовнішнього порівняння** виміряних різниць нахилених відстаней  $\Delta r_{Obs}$  (оцінок TDOA помножених на швидкість світла) з відповідними розрахунковими значеннями  $\Delta r_{Calc}$ , обчисленими для контрольованого супутника за даними сайту [www.space-track.org](http://www.space-track.org), наведені на рис. 5. Графік змінювання  $\Delta r_{Obs}$  показано на середній панелі рисунку. Він побудований за даними, отриманими з 05.12.2013 по 09.12.2013 під час супроводу супутника «Eutelsat-13B» станціями розташованими в Одесі і Миколаєві. На нижній панелі приводиться графік  $\Delta r_{Calc}$ , а на верхній — графік різниці ( $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Calc}$ ).

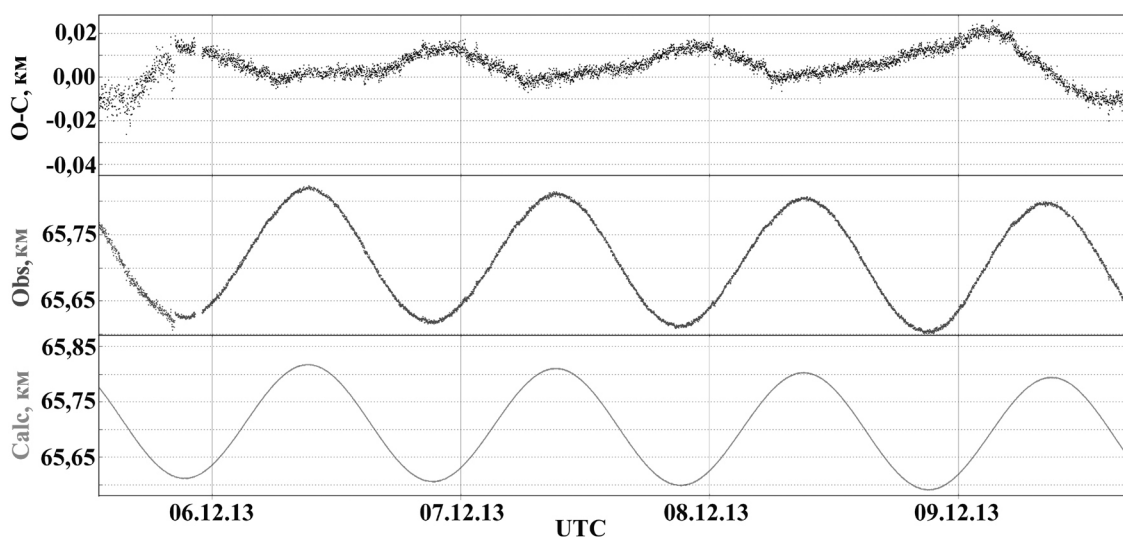


Рисунок 5 – Порівняння виміряних  $\Delta r_{Obs}$  і обчислених  $\Delta r_{Calc}$  значень різниці нахилених відстаней. По осі абсцис відкладено час UTC.

Із даних, наведених на рис. 5, випливає, що систематична складова ( $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Calc}$ ) змінюється в межах  $\pm 20$  м, тоді як випадкова складова знаходиться в діапазоні, що не перевищує 10 м. Вибіркова перевірка для інших інтервалів часу і для іншого супутника «Eutelsat-25C» показала, що регулярна складова різниці ( $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Calc}$ ) не виходить за межі  $\pm 40$  м, а випадкова складова залишається на рівні 10 м.

Одночасні спостереження супутника «Eutelsat-13B» оптичними та радіотехнічними засобами були проведені 31.10.2015 року з 01:40 по 03:17 UTC. В цей час супутник контролювався трьома станціями мережі, розташованими в Харкові, Мукачевому та Миколаєві. За даними оптичних

спостережень, виконаними миколаївською станцією Української мережі оптичних станцій (УМОС), були визначені елементи орбіти супутника. Використовуючи ці елементи орбіти обчислили різниці нахилених відстаней  $\Delta r_{Optic}$  для двох пар станцій Харків-Миколаїв і Мукачеве-Миколаїв. Порівняння  $\Delta r_{Optic}$  з різницями нахилених відстаней  $\Delta r_{Obs}$ , вимірних радіоінтерферометричною мережею, показали, що в інтервалі часу оптичних спостережень різниця ( $\Delta r_{Obs} - \Delta r_{Optic}$ ) мінімальна і становить для станцій Харків-Миколаїв і Мукачеве-Миколаїв, відповідно, за середнім значенням +3.0 м і -9.3 м і за СКП —  $\pm 2.8$  м і  $\pm 3.0$  м.

## ВИСНОВКИ

Метою досліджень був безперервний контроль орбітальних параметрів телекомунікаційних геостаціонарних супутників за результатами координатних спостережень супутника, отриманих з використанням радіоінтерферометричних вимірювань.

За 2011-2016 роки була розроблена і впроваджена експериментальна мережа в складі із п'яти станцій прийому цифрового супутникового телебачення, призначена для радіоінтерферометричних координатних спостережень ТК ГСС. В процесі дослідження було вирішено ряд задач, пов'язаних з методами отримання і обробки даних, починаючи з проблеми реєстрації первинних цифрових фрагментів сигналів DVB-S, які приймаються станціями мережі, і закінчуючи вибором способу оцінки орбітальних параметрів контрольованого ТК ГСС.

Як найбільш важливі результати проведених досліджень можна виділити наступні:

1. Створено каталог елементів орбіти ТК ГСС «Eutelsat-13B» за результатами спостережень в 2015-2016 роках. Елементи орбіти визначаються щодобово в форматі TLE та як значення координат і швидкостей супутника в системі координат EME2000.

2. Вперше розроблено радіоінтерферометричний метод визначення різниці нахилених відстаней до контрольованого ТК ГСС, заснований на кореляційному аналізі сигналів DVB-S, які приймаються географічно рознесеними приймачами супутникового телебачення і які є корисним навантаженням транспортного потоку, випромінюваного супутником. На основі методу організовано і забезпечено функціонування мережі у складі із п'яти станцій розташованих по всій території України (Харків, Мукачеве, Рівне, Миколаїв) і в Латвії (м. Вентспілс).

3. Розроблено і впроваджено оригінальне програмне забезпечення для синхронної (по GPS) реєстрації географічно рознесеними станціями

радіоінтерферометричної мережі фрагментів сигналів DVB-S та їх подальшої кореляційної обробки з метою оцінки TDOA.

4. Впроваджено оригінальне програмне забезпечення для обчислення елементів орбіти ТК ГСС за даними вимірювань відносної затримки сигналів цифрового супутникового телебачення DVB-S, які є корисним навантаженням транспортного потоку, випромінюваного супутником та проводиться безперервне визначення орбітальних параметрів контрольованого ТК ГСС. СКП визначення координат супутника в локальній системі координат не перевищує 225 м на епоху обчислення елементів орбіти. ПЗ визначення елементів орбіти розроблене в НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету при участі автора, який розробив технічне завдання на ПЗ.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Публікації у наукових виданнях, що входять до наукометричних баз даних, та в наукових фахових виданнях**

1. Бушуев Ф.И. Определение дальности до телекоммуникационных геостационарных спутников с использованием сигналов спутникового телевидения/ Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сливинский А.П., Шульга А.В. // Радиопизика и радиоастрономия. – 2012. – Т.17, №3. – С. 282–290.
2. Бушуев Ф.И. Метод и первые результаты определения разности наклонных дальностей до телекоммуникационных геостационарных спутников/ Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сибирякова Е.С., Шульга А.В., Горбанёв Ю.М.// Радиопизика и радиоастрономия. – 2015. – Т. 20, №3. – С. 238–246.
3. Бушуев Ф.И. Радиотехнический комплекс для определения координат телекоммуникационного геостационарного спутника/ Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сибирякова Е.С., Шульга А.В., Москаленко С.С., Балагура О.А., Кулишенко В.Ф.// Космічна наука і технологія. – 2016. – Т. 22, №3. – С. 50–59.
4. Bushuev F. Results of the ongoing monitoring of the position of a geostationary telecommunication satellite by the method of spatially separated basis receiving of digital satellite television signals/ Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Sybiryakova Ye., Shulga O., Moskalenko S., Balagura O., Kulishenko V.// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2016. Vol. 53, No. 5 . –P. 5–16.
5. Kaliuzhnyi M. International network of passive correlation ranging for orbit determination of a geostationary satellite/ Kaliuzhnyi M., Bushuev F., Shulga O., Sybiryakova Ye., Shakun L., Bezrukovs V., Moskalenko S., Kulishenko

V., Malynovskyi Ye.// Odessa astronomical publications. – 2016. Vol. 29, – P. 203–206.

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

6. Bushuev F.I. Using signals of satellite television to determine the distance to telecommunications geostationary satellites/ Kalyuzhny N.A., Shulga A.V., Slivinsky A.P.// The Abstract Book of the International Conference “Astronomical Research: From Near-Earth Space to the Galaxy”. Mykolaiv, Ukraine, 2011. — P. 13-14.
7. Бушуев Ф.И. Контроль вариаций дальности телекоммуникационных геостационарных спутников по базисным наблюдениям станций приема спутникового телевидения/ Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Шульга А.В., Сливинский А.П.// Тезисы докладов на IV Международном специализированном симпозиуме «Космос и глобальная безопасность человечества». Евпатория, 2012. — С. 86-87.
8. Bushuev F.I. Interferometer for observation of geostationary telecommunication satellite/ Bushuev F.I., Kalyuzhny N.A., Shulga A.V., Kozyryev Ye.S.// Proceedings of the International conference «International meeting on variable stars research Kolos 2012» [online] Available from: [http://www.astrokolonica.sk/uploads/files/kozyrev\\_interferometer.pdf](http://www.astrokolonica.sk/uploads/files/kozyrev_interferometer.pdf).
9. Бушуев Ф.И. Перспективы непрерывного контроля положения ТК ГСС методом базисного приема сигналов спутникового телевидения/ Бушуев Ф.И., Калюжный Н.А., Сибирякова Е.С., Халолей М.И., Шульга А.В.//Тези докладів конференції «Щорічна робоча нарада Української мережі лазерної локації та української мережі оптичних станцій (УМОС)». Миколаїв, 2013. — С. 14-15.
10. Bushuev F. Results of the continuous monitoring of the position of a geostationary telecommunication satellite by the method of spatially separated receiving signals of digital satellite television/ Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Shulga O.// The Abstract Book of the 4th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space Data Processing (BAASP)”. Ventspils, Latvia, 2015. — P. 15-16.
11. Бушуев Ф.И. Визначення координат телекомунікаційних геостационарних супутників методом радіоінтерферометрії сигналів цифрового супутникового телебачення/ Бушуев Ф.И., Калюжный М.П., Сибирякова Е.С., Шульга О.В., Москаленко С.С., Балагура О.А., Кулішенко В.Ф.// Тези доповідей конференції «15-а Українська конференція з космічних досліджень». Одеса, 2015. — С. 161.
12. Shakun L. Passive correlation ranging of a geostationary satellite using DVB-S payload signals/ Shakun L., Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Shulga O., Sybiryakova Ye., Bezrukovs V., Moskalenko S., Kulishenko V., Balagura O.//



- The Abstract Book of the 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology”. Odessa, Ukraine, 2016. — P. 45.
13. Kaliuzhnyi M.P. Monitoring of the orbital position of geostationary satellite by the spatially separated reception of signals of digital satellite television/ Kaliuzhnyi M.P., Bushuev F.I., Sybiryakova Y.S., Shulga O.V., Shakun L.S., Bezrukovs V., Kulishenko V.F., Moskalenko S.S., Malynovskyi Ye.V., Balagura O.A.// The Abstract Book of the International Conference “Actual Questions of Ground-Based Observational Astronomy”. Mykolaiv, Ukraine, 2016. — P. 14-15.
14. Калюжний М.П. «Синхронізація по GPS користувальницьких програм та часу персонального комп'ютера під управлінням ОС Windows (SYNNAO)»/ Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №47746, від 11.02.2013.
15. Калюжний М.П. «Визначення відносної затримки сигналу по функції взаємної кореляції (DELNAO)». Авторське свідоцтво на програмний продукт/ Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №53285, від 24.01.2014.
16. Пасивний кореляційний спосіб визначення положення космічного апарата / Калюжний М.П., Шульга О.В., Бушуєв Ф.І. // Заява про видачу патенту України на корисну модель UA04-ІК/567. Державна служба інтелектуальної власності Український інститут інтелектуальної власності. 23.03.2017.

## АНОТАЦІЯ

Калюжний М.П. Особливості застосування радіоінтерферометричних методів для визначення елементів орбіт геостационарних супутників. – Класифікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 – астрометрія і небесна механіка. – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

В дисертації йдеться про реалізований метод синхронізованого прийому псевдошумових сигналів цифрового супутникового телебачення DVB-S для визначення координат телекомунікаційних геостационарних супутників (ТК ГСС) методом радіоінтерферометрії. Для контролю положення ТК ГСС організовано їх регулярні спостереження мережею станцій (Харків, Мукачеве, Рівне, Миколаїв в Україні і Вентспілс в Латвії). По даним вимірювань TDOA (Time Difference Of Arrival) сигналів DVB-S, отриманим протягом доби, проводиться обчислення елементів орбіти

контрольованого супутника. Похибка визначення координат супутника не перевищує 225 м на епоху обчислення елементів орбіти. Проведено зовнішнє порівняння TDOA, отриманих по даним вимірювань радіоінтерферометричною мережею, з обчисленими як по ефемеридам з сайту [www.space-track.org](http://www.space-track.org), так і з використанням елементів орбіти, отриманими за оптичними вимірюванням. СКП різниці TDOA в обох випадках не перевищує 10 м, а середні значення знаходяться в межах  $\pm 40$  м.

**Ключові слова:** радіоінтерферометр, геостационарний супутник, цифрове телебачення, елементи орбіти, кореляція, пасивна радіолокація, TDOA.

### ABSTRACT

Kaliuzhnyi M.P. Features of the application of radio interferometry technique to determine the elements of the orbit of geostationary satellites. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of the physical and mathematical sciences in a specialty 01.03.01 – astrometry and celestial mechanics. – National Aviation University, Kyiv, 2017.

The thesis refers to a method for synchronized reception of the DVB-S pseudo-noise signals of digital satellite TV which was developed to determine the coordinates of geostationary telecommunication satellites (GTS) by a radio interferometry method. Regular observations of the GTS are organized using a network of stations (Kharkiv, Mukacheve, Rivne and Mykolaiv in Ukraine and Ventspils in Latvia) to track their positions. Orbit elements of the tracked satellites are computed using values of time differences of arrival (TDOA) of DVB-S signals measured within a day. The standard deviation of the satellite position determination is less than 225 m for the epoch of the orbit elements. An external comparison of the TDOA, measured by the radio interferometer network, was performed by applying TDOA computed using as ephemerides from [www.space-track.org](http://www.space-track.org) and orbit elements obtained by optical measurements. Standard deviations of the TDOA differences do not exceed 10 m, and average values are within  $\pm 40$  m.

**Keywords:** radio interferometer, geostationary satellite, digital television, orbit elements, correlation, passive radar, TDOA.

### АННОТАЦИЯ

Калюжный Н.А. Особенности применения радиоинтерферометрических методов для определения элементов орбит геостационарных спутников. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 – астрометрия и небесная механика. – Национальный авиационный университет, Киев, 2017.

В диссертации говорится о реализованном методе синхронизированного приема псевдошумовых сигналов цифрового спутникового телевидения DVB-S для определения координат телекоммуникационных геостационарных спутников (ТК ГСС) методом радиоинтерферометрии. Для контроля положения ТК ГСС организовано их регулярные наблюдения сетью станций (Киев, Мукачево, Харьков и Николаев в Украине и Вентспилс в Латвии). По данным измерений TDOA (Time Difference Of Arrival) сигналов DVB-S, полученным в течение суток, проводится вычисление элементов орбиты контролируемого спутника. Ошибка определения координат спутника не превышает 225 м на эпоху вычисления элементов орбиты. Проведено внешние сравнение TDOA, полученных по данным измерений радиоинтерферометрической сетью, с вычисленными как по эфемеридам с сайта [www.space-track.org](http://www.space-track.org), так и с использованием элементов орбиты, полученным по оптическим измерениям. СКО разности TDOA в обоих случаях не превышает 10 м, а средние значения находятся в пределах  $\pm 40$  м.

**Ключевые слова:** радиоинтерферометр, геостационарный спутник, цифровое телевидение, элементы орбиты, корреляция, пассивная радиолокация, TDOA.