

ВІДГУК

на дисертацію Калюжного Миколи Панасовича
«Особливості застосування радіоінтерферометричних методів для
визначення елементів орбіт геостационарних супутників »,
представленої на здобуття дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних по спеціальності 01.03.01 – Астрометрія и
небесна механіка в спеціалізованій вченій раді К 26.062.13
при Національному авіаційному університеті

Актуальність теми.

Розміщення космічних супутників на геостационарних орбітах забезпечує можливість постійного просторового знаходження таких супутників над одною площиною Землі. Такі властивості геостационарних орбіт обумовлюють виконання надзвичайно важливих завдань цими супутниками, а саме: ретрансляція телевізійного сигналу на великі відстані і території, забезпечення безперервного зв'язку, постійне спостереження за підсупутниковою територією в цілях дистанційного зондування Землі, безперервні метеоспостереження, функціонування елементів регіональних супутникових систем диференційної корекції для підвищення точності глобальних систем позиціонування та інших.

Таким чином, спостерігається постійне зростання заселеності області геостационарних орбіт, при тому, що розміри геостационарної комірки зменшуються і, згідно вимог Міжнародного союзу електрозв'язку, на сьогодні складають $\sim 0.1^\circ$, що на орбіті відповідає близько 60 км. Загальною тенденцією є також розміщення декількох супутників в одній геостационарній комірці (co-location). В даний час в одній комірці можуть розміщатися шість і більше супутників. Гостроту проблеми збільшує засміченість геостационарної зони антропогенними об'єктами, які знаходяться на навколосемних орбітах.

Працюючі телекомунікаційні геостационарні супутники (ТК ГСС) являються особливими об'єктами навколосемного простору. В даний час ТК ГСС розміщені в 185 геостационарних комірках. Розміщення двох, трьох, а то і чотирьох ТК ГСС в одній комірці над густонаселеними районами земної поверхні являється розповсюдженою практикою. Таке тісне розміщення потребує безперервного контролю орбітальних положень ТК ГСС.

Найбільш поширеними засобами такого контролю являються однопозиційні радары дистанціонування та супровод по азимуту і куту місця. Такий радар має антену з діаметром 10 метрів і працює на частоті 14 ГГц. Похибка визначення кутових координат становить $10''$, тоді як похибка кодового дистанціонування може бути декілька сантиметрів.

В зв'язку з ростом щільності розміщення супутників на геостационарних орбітах існує необхідність вирішення декількох таких невідкладних задач, як підвищення точності орбітального супроводу та зменшення рівня електромагнітного опромінювання супутників.

Європейське космічне агентство апробувало систему повністю

пасивної радіолокації геостационарних супутників PaCoRa (Passive Correlation Ranging), яка була реалізована корпорацією SES (Société Européennedes Satellites) протягом 2010-2013 років. Даний проект є малозатратною і високоточною альтернативою активним радарам.

Базовим принципом функціонування системи PaCoRa є використання кореляційного аналізу для обчислення TDOA (Time Difference Of Arrival) — різниці в часі прийому станціями прийому сигналів цифрового телебачення, які рознесені на поверхні Землі. Таким чином, систему PaCoRa можна вважати однією із реалізацій радіоінтерферометра. Слід зауважити, що сигнали цифрового супутникового телебачення, які випромінюються ТК ГСС, добре підходять в якості маяка для такого радіоінтерферометра, так як являються широкополосними і псевдошумовими, тобто, мають вузьку функцію автокореляції.

Важливою перевагою даного радіоінтерферометричного методу є те, що з його допомогою можна супроводжувати довільний ТК ГСС, телевізійний сигнал з якого можливо прийняти на території розміщення прийомних станцій.

Для обчислення елементів 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 по даним вимірювань TDOA.

Створення радіоінтерферометричної мережі на території України та країн східної Європи дає можливість участі в програмі ГОРИЗОНТ 2020, а також буде доцільним для забезпечення незалежного контролю орбітального положення майбутнього українського ТК ГСС «Либідь».

Мета дослідження у роботі здобувача полягала в розробці методів та створенні мережі апаратних комплексів для забезпечення оперативного контролю орбітальних параметрів ТК ГСС за результатами координатних спостережень положень супутників, отриманих з використанням радіоінтерферометричного способу спостережень.

Для досягнення поставленої мети здобувачем розв'язані наступні завдання:

1. Розроблено і впроваджено радіотехнічний комплекс для визначення параметрів орбіти ТК ГСС радіоінтерферометричним методом. Створено Європейську мережу станцій прийому сигналів супутникового телебачення з високоточною прив'язкою до PPS секунди, сформованої GPS приймачем.

2. Розроблено метод отримання TDOA та створено програмне забезпечення для її розрахунку на основі кореляційного аналізу сигналів цифрового супутникового телебачення DVB-S (DigitalVideoBroadcasting-Satellite), які складають корисне навантаження транспортного потоку, що випромінюється контрольованим ТК ГСС, і які приймаються радіотехнічними комплексами станціями Європейської мережі.

3. Для функціонування радіоінтерферометричної мережі приймальних

станцій реалізовано віддалений доступ в режимі «online» до комп'ютерів станцій з метою контролю функціонування та оперативного отримання даних спостережень.

4. Розроблено та впроваджено оригінальне програмне забезпечення для розрахунку елементів орбіти ТК ГСС в TLE форматі по даним вимірювань TDOA.

Апробація результатів дисертації представлена в вигляді доповідей на **восьми** міжнародних конференціях. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в **шести** фахових виданнях (включаючи 2 в журналах з *імпакт*- фактором), в матеріалах **восьми** конференцій, та в **двох** авторських свідоцтвах на програмний продукт.

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

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 положень геостационарних супутників радіотехнічними засобами.

Розділ 2 включає опис методу 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 станціями прийому. В результаті кореляційного аналізу обчислюються величини TDOA. Запропонований підхід еквівалентний вживаному в радіоінтерферометрії, при якому за даними кореляційного аналізу прийнятих радіосигналів, визначається просторове положення джерела цих радіосигналів.

Розділ 3 включає опис розробки та створення мережі радіоінтерферометрів для моніторингу ТК ГСС. В розділі подано інформацію про створення та модернізацію радіотехнічних засобів, які використовуються для контролю ТК ГСС.

З 2011 по 2016 рр. при участі автора в НДІ «МАО» було розроблено та введено в експлуатацію Європейську 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». Спостереження супутника «Eutelsat-13B» були поновлені 22.10.2014 мережею у складі із чотирьох станцій, розташованих в містах Київ, Мукачеве, Харків і Миколаїв. На початку вересня 2015 року до складу мережі увійшла станція, розташована в Вентспілсі (Латвія), а в лютому 2016 року станція з Києва була переміщена в Рівне. На даний час станції мережі встановлені в містах Рівне, Мукачеве, Харків, Миколаїв (Україна) та Вентспілс (Латвія).

Розділ 4. складається з результатів досліджень на різних етапах виконання роботи.

Дослідження мережі радіоінтерферометрів для моніторингу ТК ГСС. Дослідження апаратно-програмного комплексу 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).

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

Результати зовнішнього порівняння вимірних різниць нахиленої дальності Δr_{Obs} (оцінок TDOA помножених на швидкість світла) з відповідними розрахунковими значеннями Δr_{Calc} , обчисленими для контрольованого супутника за даними сайту www.space-track.org.

Результати спостережень супутника «Eutelsat-13B» представлені в вигляді каталогу елементів орбіти в форматі TLE (ДОДАТОК В в тексті дисертації).

Зміст автореферату з достатньою повнотою відображає основні положення дисертації.

Висновки.

В процесі виконання робіт здобувачем було успішно реалізовано оперативний контроль орбітальних параметрів ТК ГСС по результатам радіоінтерферометричних спостережень супутника.

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

Як найбільш важливі результати проведених досліджень можна виділити наступні:

1. Вперше розроблено радіоінтерферометричний метод розрахунку різниці нахиленої дальності до контрольованого ТК ГСС, оснований на кореляційному аналізі сигналів DVB-S, які приймаються рознесеними в просторі приймачами супутникового телебачення і які являються корисним

навантаженням транспортного потоку, випромінюваного супутником. На основі метода розроблено і впроваджено мережу із п'яти станцій, розташованих по всій території України (Миколаїв, Мукачеве, Харків, Рівне) і в Латвії (м. Вентспілс).

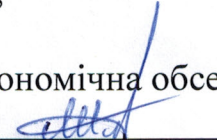
2. Розроблено і впроваджено оригінальне програмне забезпечення для синхронної (по GPS) реєстрації рознесеними у просторі станціями РК фрагментів сигналів DVB-S та їх подальшої кореляційної обробки з метою оцінки TDOA.


3. Впроваджено оригінальне програмне забезпечення для обчислення елементів орбіти ТК ГСС по даним вимірювань TDOA. ПЗ розроблене в НДІ «Астрономічна обсерваторія Одеського національного університету». Похибка визначення координат супутника склала 12 м на епоху обчислення елементів орбіти.

4. Проводиться безперервне визначення орбітальних параметрів контрольованого ТК ГСС методом радіоінтерферометрії.

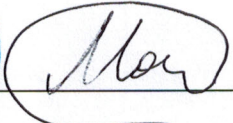
5. Створена радіоінтерферометрична мережа станцій на території України і країн східної Європи дає можливість участі в програмі ГОРИЗОНТ 2020, а також буде доцільною для забезпечення незалежного контролю орбітального положення майбутнього українського ТК ГСС «Либідь».

Здобувач безсумнівно є одним з піонерів радіотехнічних спостережень ТК ГСС в Україні. Отримані здобувачем результати є реальним досягненням в області досліджень навколосезного космічного простору в Україні. За важливістю, науковою новизною результатів і практичної значущості дисертація Калюжного Миколи Панасовича задовольняє всім вимогам, пред'явленим до кандидатських робіт по астрометрії та небесної механіки, та «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань», а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01. – Астрометрія і небесна механіка.

Науковий керівник
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
директор НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія»
Шульга Олександр Васильович 

Підпис Шульга О.В. 
в.о. вченого секретаря



 **Мажаєв О.Е.**