

УДК 621.371.351+537.86:629.7.05

В. І. Луценко¹, Д. О. Попов¹, А. Г. Лауш², В. О. Яценко³, О. О. Жаліло⁴, І. В. Діцький⁴, Є. А. Безсонов⁴

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків

² ТОВ «Навіс-Україна», Сміла

³ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Київ

⁴ Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ, КООРДИНАТ, ВЗАЄМНОГО ПОЛОЖЕННЯ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ У КОСМОСІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГНСС-ТЕХНОЛОГІЙ

Приведено результати експериментальних досліджень похибок визначення положення, орієнтації та відстані між космічними об'єктами з застосуванням приймачів сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. Вони оцінені з використанням імітатора сигналів та макетних зразків спеціальних вимірних комплексів в умовах Землі. Описано особливості побудови нового типу космічного акселерометра з надпровідним підвісом.

Ключові слова: взаємна орієнтація, стикування, імітатор ГНСС-сигналів, космічний акселерометр.

ВСТУП

Точне визначення кутового положення ШСЗ необхідне для координатної прив'язки при картуванні земної поверхні в оптичному та радіодіапазонах. Необхідно це і для визначення координат об'єктів, які спостерігають ШСЗ на земній та морській поверхнях, а також при накопиченні інформації для точного сполучення окремих кадрів зображення. Точне визначення координат та взаємного положення об'єктів необхідне також при проведенні стиковок у космосі космічних об'єктів.

Радіотехнічні засоби керування стикуванням, якими користувались протягом багатьох років у вітчизняній космічній практиці, коштовні й не дозволяють стикуватися з некооперованою станцією. Крім того, застосування напівавтоматичних засобів з телевізійними системами 1960-х рр. не

задовольняють сучасні вимоги. Зараз для обчислення кутового положення ШСЗ використовують гіроскопи, в тому числі лазерні, а також оптичні засоби спостереження, наприклад телескопи. Найбільш очевидний спосіб визначення орієнтації — зоряні давачі, мініатюрні телескопи, що розпізнають на небі одразу кілька опорних зірок. Гіроскопи компактніші від зоряних давачів, але не годяться для вимірювання поворотів понад 90°. Цього недоліку позбавлені лазерні гіроскопи. Вони дешевші та легші від звичних механічних, хоча практично не поступаються їм у точності. Але лазерні гіроскопи вимірюють не орієнтацію, а тільки кутові швидкості. На їхній основі розраховується кутове положення апарата.

Для звичайних засобів корекції кутового положення ШСЗ характерна досить велика інерційність. Разом з тим використання ГНСС-технологій дозволяє уникнути цього недоліку. При проведенні маневрування космічними апаратами, та їхньою стиковкою з другими кос-

© В. І. ЛУЦЕНКО, Д. О. ПОПОВ, А. Г. ЛАУШ, В. О. ЯЦЕНКО, О. О. ЖАЛІЛО, І. В. ДІЦЬКИЙ, Є. А. БЕЗСОНОВ, 2015

мічними об'єктами потрібно точно обчислювати координати та взаємне положення апаратів. Використання для вирішення цих задач спеціальних приймачів ГНСС-сигналів у потенціалі дозволяє отримати похибки визначення взаємного положення космічних апаратів близько 1 мм. Тому на теперішній час необхідне створення технологій, що дозволять здешевити та підвищити точність методів визначення положення, орієнтації та відстані між об'єктами у космосі. Крім того, вони дозволять визначити параметри руху космічних об'єктів, що дуже важливо при проведенні стиковок.

ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО НАВІГАЦІЙНОГО ПОЛЯ ІМІТАТОРОМ СИГНАЛІВ ГНСС

Для точного визначення орієнтації, координат та відстаней між об'єктами у космосі використовують приймачі ГНСС у режимі фазових вимірювань у поєднанні з диференціальними вимірюваннями різниці фаз між декількома просторово рознесеними приймачами. Приймачі розносять вдовж осі космічного апарата та у напрямку, перпендикулярному до неї. Це дозволяє диференціальним методом вимірювати курс, кути крену та тангажу. Особливістю вимірювального комплексу є робота приймачів ГНСС на динамічному об'єкті, швидкість якого сягає 8 км/с. Це потрібно враховувати як при обчисленні поточного значення кутового положення ШСЗ, так і його змін у системі координат, пов'язаній із супутниками ГНСС, а також координат та взаємних відстаней між різними ШСЗ.

Для відпрацювання програмного забезпечення приймачів ГНСС-сигналів для ШСЗ в умовах Землі було використано спеціально розроблений ТОВ «Навіс—Україна» (м. Сміла) імітатор ГНСС-сигналів (рис. 1).

Він дозволяє за заданими параметрами руху космічного об'єкта (КО) або декількох об'єктів, наприклад двох при стикуванні, обчислювати відстані до навігаційних супутників, які перебувають у полі їхнього зору (систем GPS — США та ГЛОНАСС — Росія). З використанням імітатора ГНСС-сигналів було створено сценарії імітації зближення двох космічних об'єктів (КО) [5, 6]. Вхідні дані координат реальних КО були надані



Рис. 1. Імітатор сигналів

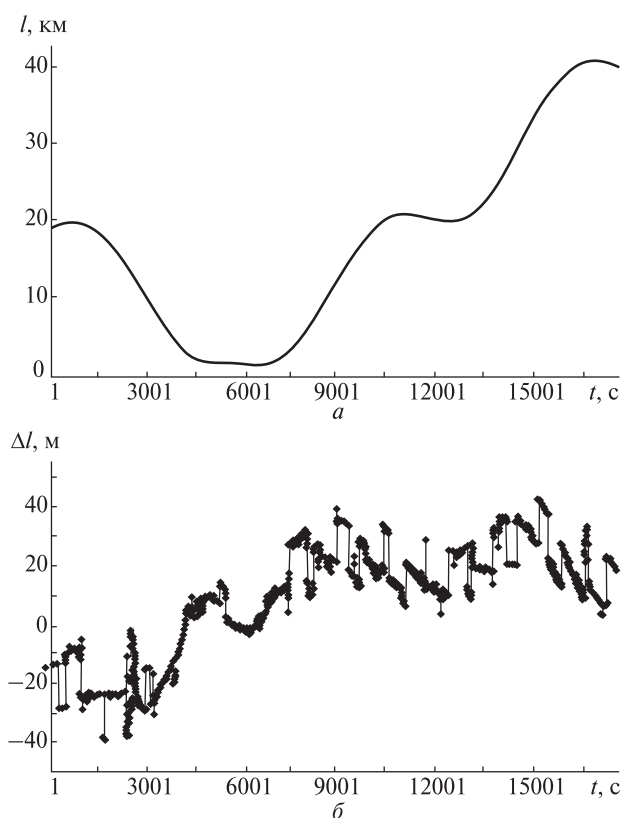


Рис. 2. Відстань l між двома реальними КО (а) та похибка Δl визначення відстані за 100 мс (б)

Конструкторським бюро «Південне» (м. Дніпропетровськ). На рис. 2, а показано зміну відстані між реальними КО. За допомогою імітатора було створено навігаційні сигнали у місці розташування КО та проведено тестування приймачів системи навігації СН4719 вітчизняного вироб-

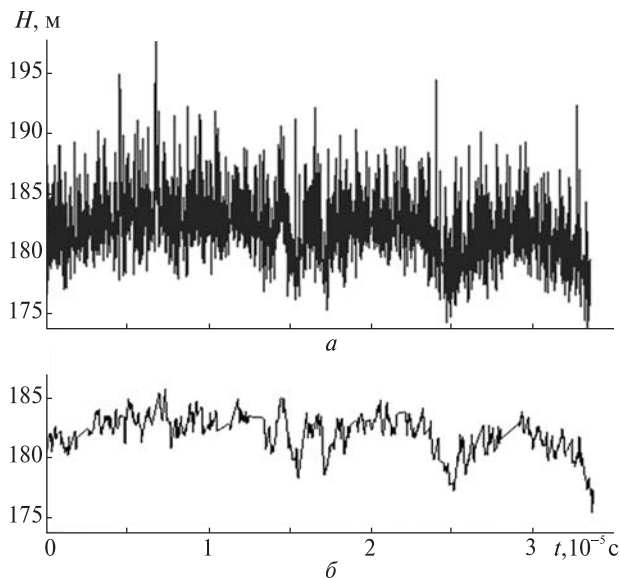


Рис. 3. Запис змін висоти H за кілька діб: a — вихідна реалізація, b — отримана після усунення імпульсної завади у сполученні з медіанною фільтрацією

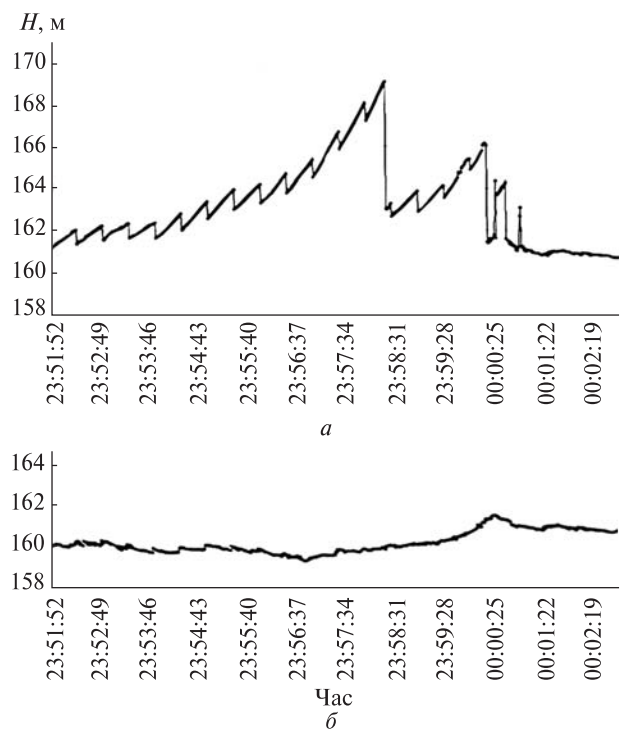


Рис. 4. Залежність визначеної висоти H від часу спостереження: a — обчислена по всіх супутниках GPS і ГЛОНАСС, b — отримана після виключення ряду супутників з рішення

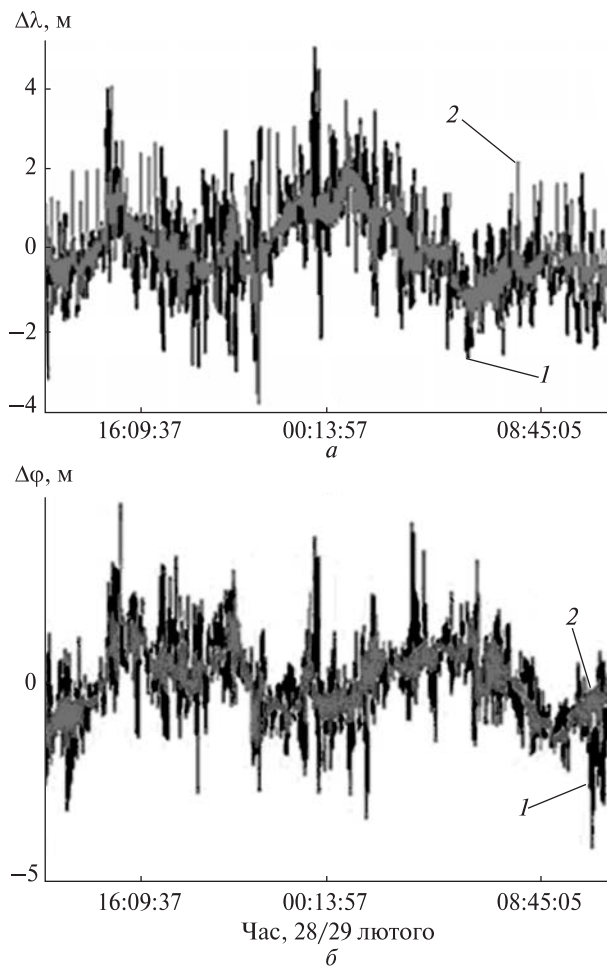


Рис. 5. Реальні (1) та прогнозовані (2) помилки визначення довготи $\Delta\lambda$ (а) та широти $\Delta\varphi$ (б)

ництва при їхньому встановленні на КО, які зближуються (рис. 2, б) і оцінено похибку визначення за їхньою допомогою взаємної відстані.

Вирішено алгоритмічну задачу побудови супутникового навігаційного поля для різних висот космічних об'єктів з використанням імітатора. При цьому у сценарії імітації навігаційного поля враховано параметри тропосфери та, у першу чергу, іоносфери Землі, що дає можливість відпрацьовувати алгоритми роботи приймачів, та методики керування КО ще до запуску об'єктів в умовах Землі. Похибка визначення взаємної відстані у більшості випадків не перевищує 20 м. Для вилучення аномально високих викидів похибок визначення координат було запропонова-

но алгоритм, який враховує не тільки значення інформаційного параметра, а й його похідної [7]. Показано, що такий підхід дозволяє істотно знизити ймовірність проходження викидів на вихід, що суттєво підвищує надійність та безпечність для систем навігації, встановлених на літаках та космічних об'єктах (рис. 3).

Дослідження поведінки сигналів супутників ГНСС при малих кутах місця дозволило запропонувати методику вилучення з навігаційного рішення задачі супутників з великим рівнем флуктуації прийнятого сигналу, яка дозволила суттєво знизити похибки визначення координат (рис. 4).

Запропоновано новий метод диференційної корекції похибок, який на відміну від інших використовує для корекції дані не однієї найближчої точки, а трьох просторово рознесених точок,

що підвищує точність та стійкість отриманих оцінок [2, 10].

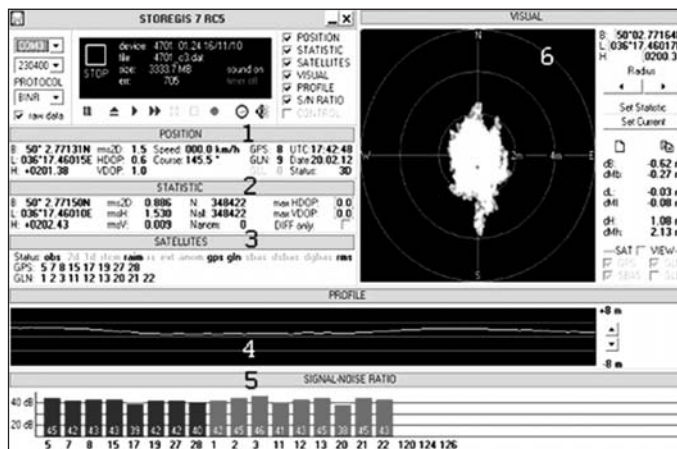
На рис. 5 наведено реальні похибки оцінки координат і прогнозовані поправки, отримані інтерполяційним методом, які можуть бути використані для корекції даних.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЙОГО ВИПРОБУВАНЬ

Вимірювальний комплекс створено на основі трьох одночастотних навігаційних приймачів СН-4719 розробки ТОВ «Навіс-Україна», антени яких розміщені на поворотній системі від малогабаритної РЛС 1РЛ-133 (рис. 6, а). Особливістю створеного вимірювального комплексу є використання вітчизняних приймачів сигналів



а

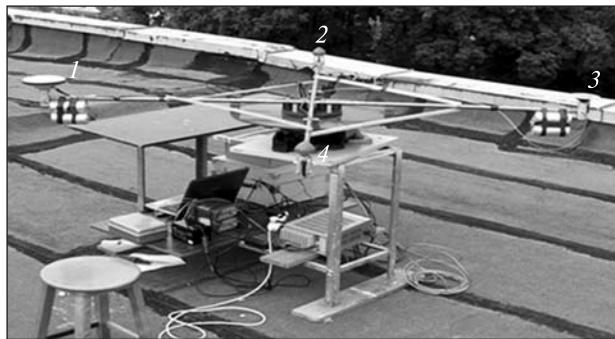


б

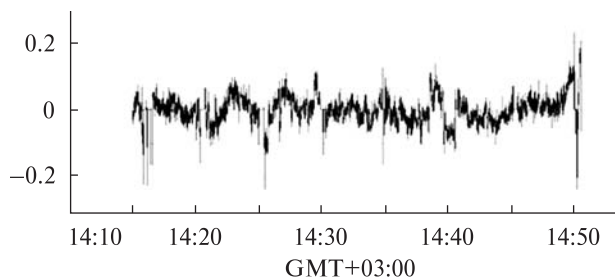
Рис. 6: а — вимірювальний комплекс для дослідження похибок визначення кутової орієнтації на базі опорно-поворотного пристрою від 1РЛ133; б — індикатор: 1 — поточні результати вимірів координат, 2 — істинні координати, 3 — видимі супутники, 4 — висота, 5 — відношення сигнал/шум для супутників, б — зміни широти та довготи за час експерименту

Результати визначення кутової орієнтації

Параметр	Кутове положення системи	Кутове положення системи на основі навігаційних даних	Кутове положення системи	Кутове положення системи на основі навігаційних даних	Кутове положення системи	Кутове положення системи на основі навігаційних даних
Азимут	0°	0.3°	120°	120.3°	120°	120.4°
Тангаж	12°	11.9°	-15°	-15.6°	12°	12.4°
Крен	0°	0.6°	0°	-0.8°	0°	-0.8°



a



б

Рис. 7. Макет кутомірної системи: *a* — зовнішній вигляд (1 — 4 — антени ГНСС), *б* — нев'язка Δ оцінки курсу

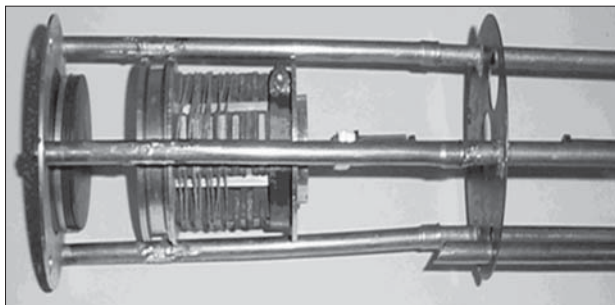


Рис. 8. Надпровідна система підвіски пробного тіла

ГНСС, що спрощує задачу створення та відпрацювання програмного забезпечення обробки та відображення інформації (рис. 6, б).

Цей комплекс дозволив досліджувати похибки визначення орієнтації об'єктів при змінах їхнього курсового кута та тангажа. Макет високоточної кутомірної системи дозволяє працювати як при фіксованому положенні антен по азимуту та куту місця, так і в динамічному режимі (при поворотах антенної системи з кутовими швидкостями $4^\circ/\text{с}$ або $8^\circ/\text{с}$). Проведено декілька серій

експериментів при циклічному характері змін азимуту в секторах від 60° до 240° , а також цілодобові систематичні вимірювання при фіксованих по азимуту та куту місця положеннях вимірювальних антен кутоміра. Результати визначення кутової орієнтації наведено в таблиці. Видно, що похибка при базових відстанях між антенами приймачів 2 м та 1 м не перевищує 1° .

ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КУТОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ПРИ СПІЛЬНІЙ ОБРОБЦІ ВИМІРЮВАНЬ GPS ТА ІНЕРЦІЙНОЇ КУТОМІРНОЇ ПІДСИСТЕМИ

Досліджено методи високоточного GPS-визначення параметрів кутової орієнтації (ПКО) рухомих об'єктів з використанням макету кутомірної системи (рис. 7, *a*), в якому реалізовано варіант кутомірної системи з використанням незалежних GPS-приймачів з несинхронізованими годинниками.

Проведено експериментальні дослідження визначень ПКО рухомих об'єктів. Експериментально показано (рис. 7, *б*), що розроблений прототип кутомірної системи дозволяє визначати кути з точністю (СКП): курсу, крену та тангажу не гірші за 0.25° [1—4]. Досліджено можливість підвищення точності й надійності бортової системи визначення ПКО завдяки оптимальній спільній обробці вимірювань ГНСС-підсистеми та вимірювань додаткової бортової інерційної кутомірної підсистеми з використанням оцінки точності.

СТВОРЕННЯ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СУПУТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Конструкція робочого макету (рис. 8) включає чотири набори постійних рідкісноземельних магнітів, вертикальні осі яких зміщені від осі підвісу в чотирьох радіальних напрямках. Пробна маса має два ніобій-титанових кільця. Верхня площина пробного тіла полірована і є відбивальною площиною для лазерних променів. Левітаційний зазор в залежності від маси пробного тіла становив $7\text{—}15$ мм.

Обґрунтовано конструктивні особливості побудови чутливого елемента акселерометра. Розроблено математичні моделі динаміки та стійкості керованого чутливого елемента [8, 9, 11, 12].

Досліджено вплив дестабілізуючих факторів на похибки вимірювань. Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини прискорення пробного тіла. Обґрунтовано технологію створення макету супутникового гравіметра на основі високотемпературних надпровідних наноплівки.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методики проведення вимірювань з використанням імітатора та макетів кутомірних систем, створені сценарії імітації радіонавігаційного поля для космічних апаратів, зокрема при їхньому зближенні, дозволяють опрацьовувати створювані методи та методики оцінювання координат з використанням ГНСС-сигналів в умовах Землі, чим заощаджуються значні кошти та скорочуються терміни їхньої розробки.

2. Верифікація запропонованого інтерполяційного методу введення корекції координат, який, на відміну від інших, використовує дані трьох базових станцій, показала, що цей метод введення корекції зменшує до 25 % дисперсію похибки визначення поточних значень координат, одночасно понижує систематичну похибку в порівнянні з тою, що одержується при стандартному диференціальному методі корекції.

Виключення з рішення навігаційної задачі супутників ГНСС з великим рівнем флуктуацій прийнятого від них сигналу, а також алгоритмів параметричної та непараметричної фільтрації разом з рангово-швидкісним алгоритмом відбракування аномально високих викидів, дозволяє суттєво знизити ймовірність появи високих похибок визначення координат.

Розроблені методи та методики виконання вимірювань дозволяють зменшити вплив умов поширення радіохвиль і підвищити точність визначення координат з використанням ГНСС.

3. Натурні випробування визначення параметрів кутової орієнтації у реальному часі за допомогою створеного вимірювального комплексу (у фазовому режимі) для окремих базових ліній кутомірної системи у фіксованому положенні та при малій динаміці повороту дозволили встановити, що можна досягнути точності визначення кутового положення при фіксованому положенні системи $\pm 0.25^\circ$. Використання двохчастот-

них приймачів дозволяє підвищити точність та швидкість отримання фіксованого рішення.

4. Показано можливість підвищення точності і надійності бортової системи визначення ПКО завдяки оптимальній спільній обробці вимірювань ГНСС-підсистеми та вимірювань додаткової бортової інерційної кутомірної підсистеми та оцінено отримані при цьому точності. Показано, що при відмові одного з чотирьох вимірювальних трактів точність визначення всіх трьох параметрів кутомірної системи (курс, тангаж та крен) знижуються у середньому на 12–16 %. При відмові двох вимірювальних трактів точність визначення кутів знижується у середньому на 22 %. Показано вплив точного калібрування фазових характеристик приймальних ГНСС-антен на систематичні похибки кутомірних визначень. У виконаних дослідженнях залишкова похибка калібрування фазових характеристик приймальних ГНСС-антен складала 3 мм.

5. Розроблено багатовимірну нелінійну математичну модель акселерометра, на основі якої отримано білінійне, а потім і лінійне наближення. Для оцінки вектора стану системи запропоновано робастний алгоритм гарантованого еліпсоїдального оцінювання множини досяжності керованої лінійної моделі, в якій враховується вплив обмежених по амплітуді дестабілізуючих факторів з невідомими статистичними характеристиками. Критерієм точності є мінімізація матриці еліпсоїда. Вперше встановлено умови появи хаотичної динаміки пробного тіла на основі обчислення спектрів показників Ляпунова.

Робота виконується відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр. та розпоряджень Президії НАН України від 01.02.13 № 56 та 04.03.14 № 140.

1. Бессонов Е. А., Дицкий И. В. Оценка и интерполяция зенитных тропосферных задержек с использованием ГНСС-наблюдений сети референцных станций // Радиотехника. — 2013. — № 173. — С. 145–152.
2. Гудков В. Н., Джаньян Ван, Лауш А. Г. и др. Интерполяционный метод формирования дифференциальных поправок при определении координат и измерении псевдодальностей в системах глобальной навигации // Физ. основы приборостроения. — 2014. — 3, № 1. — С. 42–57.

3. Дицький І. В. Дифференціальне GPS-позиціонування міліметрового рівня точності на довгих базових лініях // Тр. 18-го Міжнарод. молодіжного форуму «Радиоелектроніка і молодіж в ХХІ столітті»: Тез. докл. — Харків, 2014. — Т. 3. — С. 119—120.
 4. Жаліло А. А., Желанов А. А., Дицький І. В. і др. Експериментальна оцінка характеристик нової мережної технології одночастотного ГНСС-позиціонування сантиметрової точності з використанням спостережень розріджених мереж референсних станцій // Матер. ХІ Міжнарод. науково-техн. конф. «Авіа-2013»: Тез. докл. — Київ, 2013. — Т. 2. — С. 738—741.
 5. Латуш А. Ф., Лауш А. Г., Попов Д. О. Приймач сигналів ГНСС в умовах дії передбачених перешкоджень // П'ятий міжнарод. радіоелектронний форум «Прикладна радиоелектроніка. Становлення і перспективи розвитку» (МРФ-2014). — Харків, 2014. — С. 211—215.
 6. Лауш А. Г., Медведжонков В. А., Хоменко Ю. М. Відпрацювання систем навігації космічних апаратів з використанням імітатора навігаційного поля глобальних навігаційних супутникових систем GPS/ГЛОНАСС/GALILEO // 14-а укр. конф. з космічних досліджень: Тези доп. — Ужгород, 2014. — С. 96.
 7. Луценко В. І., Луценко І. В., Попов Д. О. і др. Устранення аномально високих помилок визначення координат в приймачах глобальних навігаційних супутникових систем // 23th Int. Crimean conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013). — Sevastopol, 2013. — P. 308—309.
 8. Наливайчук Н., Яценко В. Апаратно програмне забезпечення адаптивного опто-криогенного гравіметра на основі наноструктур // 13 укр. конф. з космічних досліджень: Зб. тез. — Київ: Кафедра, 2013. — С. 139.
 9. Яценко В., Іванов С., Наливайчук М. Алгоритмічне та математичне забезпечення супутникового адаптивного надпровідного акселерометра // 14-а укр. конф. з космічних досліджень: Тези доп. — Ужгород, 2014. — С. 82.
 10. Kravchenko V. F., Laush A. G., Lutsenko V. I., et al. The three-point method of differential correction of coordinates and pseudo-range in GPS // J. Measurement Sci. and Instrumentation. — 2014. — 5, N 1 (Mar. 2014, Sum N 17). — P. 41—45.
 11. Yatsenko V. Modeling and optimization of a superconducting space accelerometer based on functional thin films // Int. conf. “Learning and Intelligent Optimization Conference” (LION 8): Abstract. — Florida, USA, 2014.
 12. Yatsenko V., Nalivaichuk N. Opto-cryogenic sensitive element with ultrasensitive laser interferometer and microprocessor controller // IEEE Int. conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2013): Abstracts. — Kharkov, 2013. — P. 39.
- В. І. Луценко¹, Д. О. Попов¹, А. Г. Лауш², В. А. Яценко³, А. А. Жаліло⁴, І. В. Дицький⁴, Є. А. Безсонов⁴
- ¹ Інститут радіофізики і електроніки ім. А. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків
² ООО «Навіс-Україна», Смела
³ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України і Государственного космічного агентства України, Київ
⁴ Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ, КООРДИНАТ, ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В КОСМОСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС-ТЕХНОЛОГИЙ**
- Приведены результаты экспериментальных исследований погрешностей определения положения, ориентации и расстояния между космическими объектами с использованием приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Они определены с использованием имитатора сигналов и макетных образцов специальных измерительных комплексов в условиях Земли. Описаны особенности построения нового типа космического акселерометра со сверхпроводящим подвесом.
- Ключевые слова:** взаимная ориентация, стыковка, имитатор ГНСС-сигналов, космический акселерометр.
- V. I. Lutsenko¹, D. O. Popov¹, A. G. Laush², V. O. Yatsenko³, O. O. Zhalilo⁴, I. V. Ditskiy⁴, E. A. Bessonov⁴
- ¹ O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv
² Co. Ltd. «Navis-Ukraine», Smila
³ Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv
⁴ Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine
- DETERMINATION OF ORIENTATION, COORDINATES, RELATIVE POSITION AND MOVEMENT PARAMETERS OF OBJECTS IN SPACE WITH THE GNSS TECHNOLOGY**
- We give the results of experimental studies of the errors arising when the position, orientation and distance between space objects are determined using the signals from receivers of global navigation satellite systems. The errors were evaluated with the use of the signal simulator and model sample of specific measurement systems under terrestrial conditions. The construction features of a new type of cosmic accelerometer with a superconducting levitating suspension are described.
- Key words:** mutual orientation, docking, simulator of GNSS signals, space accelerometer.

Стаття надійшла до редакції 12.12.14