

УДК 519.815

В. О. Яценко¹, Т. Ф. Бекмуратов⁷, П. І. Бідюк², В. Бойко³, С. Д. Живило¹,
Х. М. Ісмаїлі⁷, В. В. Козоріз⁴, О. В. Козоріз⁵, В. М. Кунцевич¹, О. М. Набієв⁷,
А. М. Негрійко⁶, Н. Плішко¹, О. К. Черемних¹, Л. П. Яценко⁶

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», Київ

³Інститут математики Національної академії наук України, Київ

⁴Київська державна академія водного транспорту

⁵University of Toledo, College of Engineering, Department of Electrical Engineering and Computer Science Ohio, USA

⁶Інститут фізики Національної академії наук України, Київ

⁷Науково-дослідний інститут «Алгоритм—Інжинірінг» АН Узбекистану

Розробка кріогенно-оптичного датчика для високочутливих гравітаційних вимірювань

Представлена нова концепція кріогенно-оптичного датчика, що заснована на конкурентоздатному адаптивному чутливому елементі. Основою датчика є новий феномен магнітної левітації, високоточна оптична реєстрація координат левітуючого пробного тіла та робастна система обробки сигналів. Розглядається проблема врівноваження сил гравітації, що діють на вільне тіло, магнітними силами таким чином, щоб рівновага відносно всіх шести степенів свободи вільного левітуючого тіла була стійкою.

ВСТУП

На сьогодні дистанційне зондування є однією з технологій, що швидко розвиваються. Це індустрія рівня багатьох мільярдів доларів, а кількість віддалених тематичних зображень в різних ділянках постійно зростає. Вирішення багатьох практичних проблем залежить від широкомасштабного використання вимірювальних систем та принципів, на яких вони функціонують. Ці проблеми включають моніторинг природних ресурсів на основі аналізу гравітаційних аномалій, вивчення глобальних геодинамічних процесів, гравітаційного поля Землі, руху полюсів Землі та ін. Детальна інформація про гравітаційне поле Землі необхідна багатьом галузям та прикладним наукам (геологія, навігація, наука про форму Землі та ін.). Гравіметр — це тонкий інструмент [1—3, 5, 6] для вимірювань прискорення вільного падіння g . Похибка найкращих сучасних стаціонарних гравіметрів складає $10^{-8}g$, морських — $10^{-7}g$, авіаційних — $10^{-6}g$

Дослідження надпровідної магнітної левітації, відомої як «магнітна потенціальна яма» (МПЯ), стартувало в Україні наприкінці 1960-х як внаслідок розвитку низькотемпературної прикладної надпровідності, теорії електромеханічного перетворення енергії та методів теорії керування. Цей напрям визначає левітацію як стійку рівновагу надпровідного кільця чи іншого позбавленого електричного опору замкнутого витка без контакту з іншими тілами на основі використання магнітних сил [3, 4].

Метою даної роботи є викладення нового підходу до розробки чутливого елемента і методу оцінки гравітаційного сигналу на основі програмного забезпечення, яке здатне реалізувати цей метод при наявності шумів. Наша розробка орієнтована на точність $10^{-10}g$. Такий чутливий елемент та програмне забезпечення можуть бути використані для аналізу геодинамічних процесів. Крім того, накопичення експериментальних даних, отриманих для різних умов, є важливим для розвитку майбутніх методів.

КОНЦЕПЦІЯ КРІОГЕННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА

Основою супервисокої потенційної точності майбутнього гравіметра є ефект левітації МПЯ [3—5], що функціонує при нульовому електричному опорі, і тому в системі підвісу чутливої маси принципово немає тертя. На основі отриманих попередніх досліджень в галузі МПЯ-левітації розвинено методи отримання математичних моделей динаміки вільного тіла в магнітному полі короткозамкнутих надпровідних витків та їх аналізу на стійкість на основі теорем типу Ляпунова для різних варіантів геометрії надпровідних струмонесучих елементів. В результаті аналізу на стійкість отримані області в просторі параметрів, які гарантують стійкість магнітої левітації та оптимізацію магнітних і геометричних параметрів на основі теорії без використання вартісних та довготривалих експериментів [4].

Ці результати стали основою розробки конструкції надпровідного гравіметра та обладнання для здійснення гравітаційного експерименту. Були проаналізовані спрощені динамічні моделі вільної маси, вивчені питання взаємного зв'язку коливань в напрямку різних лінійних та кутових координат вільної маси. Досліджені питання режимів підвіски, близьких до критичних, коли можливе руйнування надпровідного стану критичними струмами. Проаналізовані можливості використання магнітолевітаційних ефектів високотемпературної надпровідності для гравіметра.

Найефективніше використання переваг систем з магнітною підвіскою, що мають практично необмежену чутливість, вимагає відповідної системи реєстрації вимірів зміщення пробного тіла. У чутливому елементі положення пробного тіла визначається за допомогою лазерного сенсора. Це дозволяє виключити можливі збурення положення пробного тіла електричними та магнітними полями на відміну від звичайних сенсорів, що використовувалися у попередніх системах.

Сучасні інтерферометричні методи та динамічні ефекти у лазерній генерації, викликані слабкими зовнішніми сигналами, використовуються для детектування надмалих переміщень пробного тіла. Були відібрані та реалізовані експериментальні схеми з лазерними детекторами зміщення, які забезпечують вимірювання зміщень пробного тіла та перетворення сигналу у цифрову форму для подальшої математичної обробки.

Основним результатом робіт, спрямованих на розробку оптичної системи вимірювань малих зміщень пробного тіла, є висновок про те, що для оптичного вимірювання координат пробного тіла необхідно застосувати інтерферометричний метод, який потенційно може забезпечити точність ви-

мірювання координат пробного тіла не гірше від 10 нм. За попередніми оцінками цього достатньо для досягнення необхідної чутливості датчика. Розроблено функціональну схему оптичного датчика на основі діодного лазера з зовнішнім резонатором як джерела монохроматичного випромінювання та одномодового оптоволокна як каналу транспортування світла до пробного тіла зі збереженням когерентності оптичного випромінювання.

Запропоновано системний підхід до вивчення та оптимізації нелінійної динаміки надпровідної пробної маси. Цей підхід можна використати при створенні гібридного програмного забезпечення, що оцінює динамічні характеристики вихідного оптичного сигналу. На додаток, щоб створити моделюючу програму, яка використовує існуючу інформацію, що може бути інтерпретована динамічно, ми пропонуємо техніку, засновану на комбінації нелінійної динаміки, глобальної оптимізації та нелінійного оцінювання. Ми називаємо такий підхід системним.

Отримані необхідні попередні умови для аналізу можливостей реалізації стійкої підвіски вільної маси на основі магнітної взаємодії між двома струмовими кільцями нульового електричного опору як моделями надпровідних магнітів, оперуючих в режимі незатухаючого струму. Була запропонована нова постановка проблеми побудови математичної моделі левітації. Вона сформульована як проблема необхідних та достатніх умов стійкості рівноваги для консервативної нелінійної динамічної системи з вільним тілом. Теорію таких динамічних систем вперше розробив В. В. Козоріз [3]. Розглядувана динамічна система знаходиться під дією сил ваги, магнітних сил та моментів сил, що згенеровані нерухомими струмонесучими елементами та такими ж елементами на вільному тілі, а також іншими силами, які вважаються малими по відношенню до названих.

Ключовим елементом силової взаємодії є замкнений виток нульового електричного опору як модель магніту. Короткозамкнений виток нульового опору має добре відому властивість зберігати повний магнітний потік (магнітне потокозчеплення), що зв'язане з цим витком. Кажуть, що повний потік заморожений. Високий ступінь ідеальної електропровідності досягається в надпровідниках. Якщо опір надпровідника і не є строгим нулем, однак різниця опорів у надпровідному і нормальному станах більша, ніж різниця опорів міді і найкращого ізолятора.

Але надпровідник — це не тільки ідеальний електропровідник, що має нульовий електричний опір ($\rho = 0$). Він також є ідеальним діаманетиком ($\mu = 0$). Прояв цих двох макроскопічних властивостей надпровідності залежить від форми тіла та обмежений критичними температурами і критич-

ними магнітними полями. Якщо рівень поля нижче критичного, і зразок має форму однозв'язної області (просторово подовжене тіло ненульового об'єму, що не має «дірок» для проникнення магнітного поля), то проявляється лише ідеальний діамagnetизм. З іншого боку, якщо надпровідник має форму замкненого витка, і відношення між його товщиною та подовжнім характерним розміром наближається до нульового значення, то властивості такого зразка повністю визначаються його нульовим опором і не залежать від діамagnetизму.

Модель магніту, вибрана нами, залежить тільки від ідеальної електропровідності та її прояву у зразках типу тонкий замкнений виток. Вона не залежить від діамagnetизму надпровідника в тому сенсі, щоб на підставі ефекту Браунбека досягти стабільності вільного стану. Це визначається тим, що товщиною витків можна знехтувати. Якщо такий виток перебуває у стані надпровідності, але його мала частина переведена в нормальний стан, він не проявляє діамagnetичних властивостей. Більше того, він взагалі немагнітний. Якщо стан ідеальної електропровідності згаданої частини відновлено, такий виток продовжує демонструвати недіамagnetичні властивості, оскільки останні залежать від об'єму зразка, який в нашому наближенні є нульовим. Тому ми повинні зробити висновок, що не існує можливості забезпечити стійку рівновагу вільного стану на основі принципу Ірншоу—Браунбека, єдиного відомого і строго обґрунтованого принципу магнітної левітації. Проте розглядувана нами модель проявляє властивості зберігати незмінним повний магнітний потік як будь-який виток нульового електричного опору. Постійність поточкозчеплення залишається в силі незалежно від будь-яких змін положення розглядуваного витка з $\rho = 0$. Остання умова може бути реалізована умовами надпровідності.

Наявність нульового опору — це лише один місточок, що пов'язує нашу модель з надпровідністю.

Необмежена кількість надпровідників у формі замкненого витка нульового електричного опору з'явилась після відкриття Кунцлером аномально великих густин струму у сполуках типу Nb_3Sn в 1961 р. Критичні поля для цього матеріалу складають 24.5 Тл при $T = 0$ К, а для NbTi — 14 Тл. Такі рівні полів стали основою появи маси магнітів різних розмірів та форм, що здатні генерувати і оперувати в магнітних полях рівня 10—20 Тл. Тому модель замкненого витка нульового електричного опору придатна для низькотемпературних магнітів, що оперують в режимі незатухаючого струму. Ця модель можлива також в застосуванні до високотемпературних надпровідників за умови

проникнення магнітного поля і якщо такий матеріал може бути представлений як набір витків нульового електричного опору. Нарешті, недавнє відкриття фулеренів та їхньої здатності проводити незатухаючі струми і заморожувати магнітне поточкозчеплення у високих магнітних полях фіксує придатність нашої моделі магніту і до такої субстанції, якщо вона може бути виготовлена у вигляді замкненого витка.

Варто зауважити, що наша модель не враховує квантування магнітного потоку, що суттєво для надпровідної електроніки, оскільки розглядаються сильноструміві застосування. Ми спростуємо також картину проникнення поля в зразок типу «замкнений виток» та розглядаємо магнітне поле та струм зосередженими на невеликій глибині матеріалу витка. Глибина проникнення λ вважається на рівні лондонівської глибини проникнення (40—60 нм). Ця обставина приводить до різних формул для внутрішньої індуктивності, відповідальної за поле всередині провідника. Поля витків ідеальної електропровідності та надпровідного відрізняються полем всередині витків. Різниця зникає, коли параметр $\tau = d/a$ (параметри d та a є відповідно товщина та характерний розмір витка) прямує до нуля. Саме такий випадок ми і вивчатимемо.

На основі теоретичних досліджень МПЯ-левітації, обмежень на «магнітну геометрію» підвіски, отриманих на основі достатніх умов стійкості та викладених вище, були розроблені декілька варіантів конструкції робочої моделі підвісу. Робоча модель враховує також простоту виготовлення і водночас мінімальні кошти на це. Тому частина підвіски робочого макету запропонована у двох варіантах. В одному з них за нерухоме джерело магнітного поля вибрано постійний магніт. Це спростує виготовлення та забезпечення умов прояву МПЯ для отримання стійкості підвіски, оскільки виключає потребу в теплових ключах.

СИСТЕМА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Функціональна структура системи обробки сигналів складається з адаптивного компенсатора, адаптивного калманівського та цифрових фільтрів, оцінювачів на основі оберненої динамічної моделі та показників Ляпунова, нейромережі, системи, що моделює динаміку пробного тіла та бази даних. Оригінальність підходу до обробки сигналів визначається засобами, що інтегрують оцінювання гравітаційного збурення з моделями обробки даних. Система обробки сигналів включає підсистему взаємодії ядра програми з базою даних, а також з алгоритмами для її взаємодії з зовнішнім сенсором

і моделями оцінки сигналів. Вона забезпечує також послідовне включення програмних модулів, що можуть бути розроблені на основі Matlab. Були передбачені спеціальні засоби для суттєвого зменшення рівнів внутрішніх та генерованих світлом шумів на основі використання особливостей оперування детектора і програмного забезпечення.

Проведено аналіз характеристик інтенсивності шуму оптичного вимірювача координат з метою використання його результатів при розробці чутливого елементу. Було отримано кореляційну функцію та спектральну щільність шуму з урахуванням властивостей полосової фільтрації в інтерферометрії і довільної модуляції хвильового фронту. Аналіз включав модуляцію дробового шуму як спеціального випадку шуму інтенсивності. Для детектування обмеженого дробовим шумом сигналу було знайдено відношення сигнал/шум як функції модуляційних параметрів і описана процедура оптимізації відношення сигнал/шум по відношенню до демодуляції сигналу. Запропоновано алгоритм компенсації шуму, який базується на глобальній оптимізації. Цей компенсатор має можливість отримувати корисну інформацію з зашумленого оптичного сигналу. Інформаційний сигнал являє собою оптичний сигнал, який спотворено адитивним гауссівським шумом. Система компенсації шуму припускає використання двох типів сенсорів. Первинний сенсор формує зашумлений вихідний сигнал. Вторинний сенсор вимірює шум, який некорельований з корисним сигналом і корельований з шумом у первинному сенсорі.

Розроблено нейромережні алгоритми аналізу сигналів та оцінювання гравітаційних збурень на основі інформаційного підходу. Досліджено похибку ентропійно-мінімізаційного підходу до ідентифікації динаміки пробного тіла. Вивчено ефект впливу часового вікна Парсена на пошук мінімуму ентропії. Аналітично показано, що мінімум ентропії може бути локальним, в той же час глобальний мінімум непараметричного оцінювання ентропії може бути знайдено на основі використання інформації по Шеннону та гауссівських ядер. Проведено порівняльний аналіз мінімізації ентропії похибки та мінімізації ентропії середньої квадратичної похибки стосовно короткочасового прогнозу експериментальних даних. Статистичні властивості похибки оцінювання центральних моментів високого порядку експериментальних часових рядів та прогнозування використовуються як критерії порівняння. Розроблено математичний опис нової структури нейромережі інгібіторного типу, яка складає важливий клас нейромереж. Розглянуто і визначено необхідні умови стійкості поведінки конкурентивної інгібіторної нейромережі (КІНМ) та розроблено

алгоритм, що базується на умовах стійкості. Розроблено алгоритм реалізації інгібіторної нейромережі в застосуванні до задачі оцінювання сигналу, що характеризує положення левітуючого тіла в просторі. Алгоритм КІНМ може бути реалізований у послідовній або паралельній формі. Моделювання КІНМ за допомогою запропонованого алгоритму вимагає приблизно на три порядки менше часу, ніж безпосереднє інтегрування рівнянь. Розв'язок задачі оцінювання впливу збурень на левітуюче тіло має важливе значення для успішного виконання фізичних експериментів. Запропонований алгоритм буде використано для виділення корисних компонент вимірів при дослідженні поведінки левітуючого тіла.

Запропоновано ряд методів обробки сигналу з метою пошуку найбільш інформативних характеристик щодо оцінки корисного сигналу та чисельні алгоритми, призначені для автоматизації обчислень гравітаційних збурень. Було запропоновано чотири підходи до обробки сигналів:

- 1) підхід на основі використання нормалізованого по методу найменших квадратів адаптивного фільтра та лінійного прогнозу;
- 2) підхід на основі компенсатора з адаптивним цифровим фільтром;
- 3) підхід на основі нестационарного канального оцінювання та фільтра Калмана;
- 4) підхід на основі цифрового фільтра зі скінченною імпульсною характеристикою.

Було запропоновано декілька реалізацій на основі перелічених підходів. Перша реалізація побудована на основі методу найменших квадратів та адаптивного фільтра з лінійним прогнозом. Друга реалізація побудована з використанням відомого підходу на основі адаптивного компенсатора з RLS-фільтром. Третя реалізація базується на нестационарному канальному оцінюванні та фільтрі Калмана. Четверта реалізація базується на формулі Савицького і Голая для фільтрації. Показано, що частковим випадком цифрового фільтра є фільтр Савицького—Голая. Проведено тестування алгоритмів за експериментальними даними. Перша реалізація дозволила визначити параметри, що забезпечують стійкість алгоритмів.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз відомих методів досягнення левітації в некерованій (пасивній) системі з використанням магнітних сил і продемонстровано новизну левітаційного принципу та переваги його використання для створення високоточних гравіметрів. Для різних моделей магнітів (надпровідні

струмові кільця, довгі циліндри, надпровідні струмові прямокутники) та різної їхньої кількості числа на вільній масі та корпусі приладу отримано достатні умови стійкості МПЯ-левітації у вигляді обмежень на геометричні та магнітні параметри системи підвісу вільної чутливої маси. Ці результати стали основою для проектування робочої моделі надпровідного гравіметра. Були вивчені динамічні режими вільної маси та взаємозв'язки коливань по відношенню до різних координат вільної маси, які впливають на проблему реєстрації зміщень вільної маси при проведенні гравітаційних вимірювань. Проведені дослідження виключають можливість використання відомих левітаційних ефектів високотемпературної надпровідності для отримання високоточних гравіметричних вимірів в силу надто великого тертя та низького рівня сил левітації, генерованих високотемпературними надпровідними магнітами. Розроблені конструкції робочого макету надпровідного гравіметра, що застосовують оптичний метод реєстрації положення вільної маси гравіметра. Досліджені варіанти обладнання, необхідного для проведення пробних левітаційних експериментів.

2. Розроблено функціональну схему оптичного датчика на основі діодного лазера з зовнішнім резонатором як джерелом монохроматичного випромінювання та одномодового оптоволоконна як каналу транспортування світла до пробного тіла зі збереженням когерентності оптичного випромінювання. Цей метод дозволяє забезпечити необхідну точність вимірювання положення пробного тіла не гірше від 10 нм, що за попередніми оцінками є достатнім для досягнення необхідної чутливості датчика. Аналіз існуючих методів лазерної інтерферометрії показав, що найбільш перспективним для створення оптичного сенсора є оптичний інтерферометр зі зворотним зв'язком, у якому гетеродинний сигнал створюється за допомогою оптичного зворотного зв'язку при відбиванні лазерного пучка від об'єкта та спрямування його назад до лазера. Запропонована функціональна схема оптичного сенсора базується на новому підході, який полягає у комбінації ідеї зворотного зв'язку та інтерференції світла, відбитого пробним тілом та краєм оптичного волокна. У цьому випадку, незважаючи на малу довжину когерентності випромінювання лазерного діода, його потужність залежить від зміщення пробного тіла, і цю залежність можна використати для вимірювання координат пробного тіла. Завдяки своїй простоті новий метод є багатобічним не лише для реалізації мети проекту, а й для використання у багатьох інших галузях.

3. Запропоновано функціональну структуру пакету прикладних програм для обробки сигналів. Вона складається з адаптивного компенсатора, калманівського та цифрових фільтрів, оцінювачів на основі оберненої динамічної моделі та показників Ляпунова, системи, що моделює одновимірний рух пробного тіла та бази даних. Для системи «інструмент—чутливий елемент» були розроблені формат даних та протокол обміну даними. Розроблено програмне забезпечення, що включає оцінювання гравітаційного впливу, бібліотеку сигналів та бази даних про інформацію, необхідну для вимірювань, а також географічні координати місця вимірювань сигналу.

Робота підтримана Науково-технологічним центром України в рамках проекту V039k.

1. Goodkind J. M. The superconducting gravimeter // *Rev. Sci. Instrum.*—1999.—70, N 11.—P. 4131—4152.
2. Goodkind J. M., Warburton R. J. The superconducting gravimeter // *IEEE Trans. Magn. MAG.*—1975.—11, N 2.—P. 2142—2151.
3. Kozorez O., Kozoriz V. The new linear motor phenomenon and its characteristics // *Intern. Conf. "Linear Drives for Industry Applications LDIA 2003"*, Birmingham, UK, 8-10 September, 2003. — P. 212—216.
4. Kozorez O., Kozoriz V., Kryvtsov V., et al. New Maglev Concept and Its Acceptability to Swissmetro // *17th Intern. Conference on Maglev and Linear Drives*, Lausanne, Switzerland, 3-6 September, 2002.—P. 123—129.
5. Yatsenko V. Functional structure of the cryogenic optical sensor and mathematical modeling of signal // *SPIE conf. "Optical Science and Technologies"*, 3-8 August 2003, San Diego, USA: *Proc. of SPIE.*—2003.—5172.—P. 121—132.
6. Yatsenko V., Principe J. Cryogenic sensor for space operation. // *SPIE conf. "AeroSense. Technologies and Systems for Defence & Security"*, 21—25 April 2003, Orlando USA: *Proc. of SPIE.*—2003.—5071.—P. 135—146.

DEVELOPMENT OF THE CRYOGENIC-OPTICAL SENSOR FOR HIGHLY SENSITIVE GRAVITATION MEASUREMENTS

V. O. Yatsenko, T. F. Bekmuratov, P. I. Bidiuk, V. Boiko, S. D. Zhyvyilo, Kh. M. Ismaili, V. V. Kozoriz, O. V. Kozoriz, V. M. Kuntsevych, O. M. Nabiiev, A. M. Negriiko, N. Plishko, O. K. Cheremnykh, L. P. Yatsenko

A new conception of the cryogenic-optical sensor based on a competitive adaptive sensitive element is given. The sensor element is based on a new magnetic levitation phenomenon, high-precision optical registration of mechanical coordinates of a levitating body, and the robust signal processing tool. We consider the problem of equilibrating gravity forces acting on a free body by magnetic forces so that the six degrees of freedom of a free body are stable. The registration of free body mechanical coordinates is based on the optical system. The main application result of the investigation consists in justification of functional structure.