

УДК 531

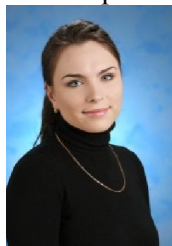
О.М. Безвесільна д.т.н.,
А.А. Остапчук,
Є.В. Гура

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛІСТИЧНОГО ГРАВІМЕТРА

В статті розглянуто питання: можливості вимірювання прискорення сили тяжіння за допомогою абсолютних балістичних гравіметрів; удосконалення системи автоматизації обробки інформації; можливості подальшого створення системи відеоспостереження за процесом отримання результатів для забезпечення максимальної точності вимірювань



О.М. Безвесільна д.т.н.,
професор Національного
технічного України «КП»



А.А. Остапчук, доцент
Житомирського
державного
технологічного
університету



Є.В. Гура, аспірант
Національного технічного
університету України
«КП»

Постановка проблеми

Вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння (g) з високою точністю є базовим елементом успішного розв'язання широкого спектру наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, побудови моделей глибинних щільнісних неоднорідностей, пошуку покладів корисних копалин, використання величини g в якості основи для визначення інших фізичних величин. Апаратним забезпеченням для вирішення цих наукових задач є гравіметричні прилади.

Сучасні дослідження в області розробки гравіметричної апаратури зосереджені на двох аспектах: перший – підвищення точності вимірювань балістичними гравіметрами шляхом усунення впливу сейсмічних коливань на процес вимірювання, другий – побудова ефективних автоматизованих систем процесу гравіметричних вимірювань.

Дані про сучасні розробки таких систем свідчать про те, що вітчизняні прилади на даний час поступаються за своїми технічними характеристиками (за кінцевою точністю результатів вимірювань та іншими метрологічними параметрами) зарубіжним розробкам. Крім того, в даний час в Україні проводиться програма оновлення гравіметричного обладнання опорних пунктів національної геодезичної мережі.

В наш час широкого поширення набувають комерційні варіанти конструкцій гравіметрів. Комерційні гравіметри пристосовуються до умов роботи у важких кліматичних умовах: підвищена вологість, високі температури навколишнього середовища, шуми місцевого транспорту, інші шуми міста (будівельні майданчики, промислові шуми та інш.). Точність таких гравіметрів, звичайно, менша, це дозволяє знизити їх ціну.

Великі промислові групи, як правило, закуповують гравіметри для проведення власних науково-дослідницьких робіт в галузі геологорозвідки: пошуки покладів нафти, газу, інших корисних копалин. До таких приладів висувають певні вимоги:

компактність, універсальність у застосуванні, зручність та простота обслуговування, ремонтпридатність, тривалий наробіток на відмову, уніфікованість вузлів поєднання з іншою апаратурою, спроможність працювати у важких умовах навколишнього середовища, достатня точність, доступна ціна.

Аналіз досліджень

Проведені дослідження в області вимірювання прискорення сили тяжіння показали, що балістичний метод полягає у вимірюванні довжини шляху, що пройшло вільно падаюче тіло, яке

почало свій рух з нульової початкової швидкості за певний проміжок часу. На основі залежності довжини шляху від часу визначається прискорення сили тяжіння.

Створення досконалих балістичних гравіметрів (БГ), стало можливим після винаходу лазерів, яким притаманні високі монохроматичність та когерентність.

Широке впровадження у вимірювальну техніку лазерів та фотоелектричних перетворювачів, які модулюють світловий потік в електричні сигнали дозволило створити в нашій країні та закордоном цілий ряд конструкцій лазерних вимірювачів. Основними перевагами яких є: підвищення точності вимірювань; скорочення часу вимірювань; автоматизація вимірювального процесу; зниження рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

У роботі досліджено можливості підвищення характеристик точності гравіметричної апаратури, побудованої на основі лазерів та фотоелектричних перетворювачів, розраховані математичні моделі балістичного гравіметра та розглянуто можливість побудови функціональної схеми основних модулів автоматизованої системи БГ.

Мета роботи: підвищення точності вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом дослідження абсолютного гравіметричного приладу та розробки на основі наукового пошуку автоматизованої системи вимірювань значень прискорення сили тяжіння.

Основна частина.

Принцип дії гравіметра полягає в балістичному методі вимірювання абсолютного значення прискорення сили тяжіння (ПСТ) g , яке визначається за результатами вимірювання шляху та часу вільного падіння оптичного кутового відбивача. Вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється лазерним інтерферометром, а мірою інтервалів часу є сигнали прецизійного (наприклад, рубідієвого) стандарту частоти [5].

Визначення абсолютного значення ПСТ виконується відомими гравіметрами з похибкою 0,5 мкГал, яка включає як інструментальну похибку, так і вплив зовнішніх умов вимірювання.

Балістичний гравіметр, що застосовується, повинен мати практично необмежений діапазон вимірювань, нестабільність довжини хвилі випромінювання робочого лазера за час спостереження не повинна перевищувати $5 \cdot 10^{-9}$, відносна похибка стандарту частоти повинна бути не більше $5 \cdot 10^{-10}$, тиск залишкового газу в балістичній камері не повинен перевищувати $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. стовпа.

Технічні характеристики абсолютного балістичного гравіметра: середньоквадратична похибка вимірювання – не більше $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ м/с²; систематична похибка – не більше $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ м/с²; габарити гравіметра:

- оптико-механічний блок – $1200 \times 700 \times 700$ мм;
- електронний блок – $620 \times 560 \times 660$ мм;
- загальна вага гравіметра – 180 кг.

На основі вивчення сучасної патентної інформації та науково-технічних джерел встановлено, що у розвитку балістичних гравіметричних приладів чітко визначились таких два напрямки балістичного методу: “Free-fall” і “Rise&fall” (несиметричний та симетричний). Аналіз конструктивних елементів приладу свідчить про недосконалість будови та складність вирішення технічних проблем, пов’язаних з підвищенням точності вимірювань за допомогою абсолютного балістичного гравіметра. На сьогоднішній день не існує конструктивної схеми балістичного вимірювального приладу, який вимірює прискорення сили тяжіння з точністю більше 0,5 мкГал, що підтверджує актуальність визначених нами завдань.

Набір технічних методів та засобів вимірювання шляху і часу різноманітний. Не зважаючи на це, можна описати структуру сучасного нового балістичного абсолютного гравіметра. На рис. 1 надано спрощену схему нового балістичного лазерного гравіметра, що працює за симетричним методом. Головним недоліком балістичних гравіметрів є їх висока чутливість до великої кількості впливових факторів, що, в свою чергу, тягне за собою конструктивну складність, великі габаритні розміри та вагу гравіметрів, а також їх периферійних приладів, складність обробки результатів, невисоку продуктивність вимірювань тощо.

Задача вимірювання ПСТ балістичними методами зводиться до вимірювання довжини та часу. Тому математична модель повинна виявити аналітичний зв’язок шляху, пройденого пробним тілом, з часом і зовнішніми збурюючими впливами. Найбільш конструктивним буде

такий підхід до побудови моделі, при якому, з однієї сторони, розглядається вільний рух пробного тіла в інерційній системі координат з урахуванням вертикального градієнта ПСТ та сил опору, а з іншої – визначається закон руху деякої зв'язаної системи координат, яка зміщується під дією зовнішніх інерційних збурень і утримуючої відлікової системи гравіметра [3].

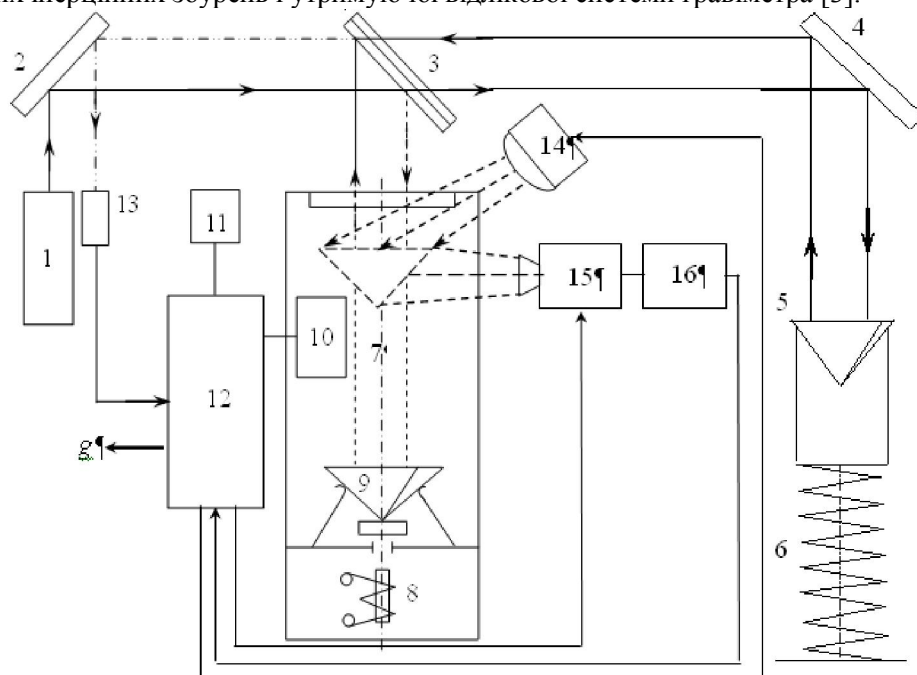


Рис. 1. Схема нового БЛГ:

1 – лазер; 2 – дзеркало лазерного інтерферометра; 3 – оптична ділильна пластина; 4 – дзеркало сейсмографа; 5 – закріплений кутовий відбивач сейсмографа; 6 – довгоперіодичний сейсмограф; 7 – вакуумна камера; 8 – пусковий пристрій; 9 – пробне тіло (кутовий оптичний відбивач); 10 – манометр; 11 – генератор міток часу; 12 – ЕОМ; 13 – фотоелектричний помножувач; 14 – джерело імпульсного освітлення; 15 – відеокамера; 16 – блок апроксимації траєкторії руху пробного тіла

Розгляд вільного руху пробного тіла, підкинутого вертикально вгору в інерційній системі координат, зводиться до рішення нелінійного диференціального рівняння 2-го порядку, наступного вигляду:

$$m \cdot z'' = m \cdot (g_0 + \alpha \cdot z) - \gamma_1 \cdot z' - \gamma_2 \cdot (z')^2, \quad \text{де } m - \text{маса пробного тіла; } z - \text{вертикальна координата; } \alpha -$$

вертикальний градієнт; γ_1, γ_2 – коефіцієнти, які визначають вклад сил опору відповідно пропорційних першій та другій степеням швидкості руху пробного тіла.

Розв'язання рівняння (1) методом послідовних наближень з використанням перетворень Лапласа і подальшим розкладом в ряд по степеням z , призводить до наступного рівняння:

$$z(t) = g_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot t^n,$$

де A_n – сукупність коефіцієнтів, які визначаються з умов руху пробного тіла в балістичному блоці відносно відлікової системи.

Цей вираз описує рух пробного тіла в інерційній системі координат. В умовах реального вимірювання ПСТ координата пробного тіла визначається у зв'язаній системі координат, що піддається збуренням. Як відомо, координати пробного тіла в інерційній системі однозначно залежать від його координат у зв'язаній системі:

$$\bar{R}_i = \bar{r} + \bar{R},$$

де \bar{R}_i – радіус-вектор пробного тіла в інерційній системі; \bar{r} – радіус-вектор пробного тіла у зв'язаній системі; \bar{R} – радіус-вектор, що описує зміщення зв'язкової системи.

Проведення вимірювань на великій кількості інтервалів до недавнього часу відбувалося із значними технічними труднощами, у зв'язку з чим, зазвичай, обмежувалися 2...4 вимірювальними інтервалами. При цьому забезпечували такі умови експерименту, при яких коефіцієнти A_i старших порядків виявлялися знехтуваними (це і складає основу труднощів у сучасних точних гравітаційних вимірюваннях).

Завдяки розвитку мікроелектроніки і обчислювальної техніки в наш час, практично всі закордонні балістичні гравіметри побудовані за схемою вимірювання великої кількості інтервалів шляху та часу.

Подібні розв'язання системи рівнянь (5), для різних часткових випадків, можна знайти у різноманітній літературі [2]. Так, симетричний спосіб буде відрізнятися від несиметричного лише значенням початкової швидкості, а багато станційний - від двостанційного – кількістю i -рівнянь. Варіюючи розмірами матриці коефіцієнтів системи рівнянь (5), можна одержати усі можливі сполучення умов вимірювань ПСТ за допомогою балістичного методу. Однак, слід зазначити, що симетричний спосіб буде чітким лише при дотриманні повної симетрії інтервалів вимірювань (коли положення точки О на рис. 2 буде чітко відомим в просторі або в часі, що принципово неможливо).

Існують наступні методи наближеного симетрування часу t :

- прямий пошук вершини траєкторії та симетрування часу;
- симетрування шляху, що пройшло пробне тіло, від початку інтервалу вимірювання до вершини траєкторії;
- симетрування по швидкості руху пробного тіла.

Найчастіше використовують другий та третій методи симетрування моментів вимірювання.

Висновки

У даній роботі нами розглянуті найбільш важливі, на наш погляд, питання, що стосуються конструктивних і функціональних особливостей сучасного абсолютного лазерного балістичного гравіметра. Теоретичне дослідження проводиться на базі критичного аналізу сучасної вітчизняної і зарубіжної бази наукових даних. Дослідження практичних питань – шляхом аналізу даних експериментальних досліджень проведених у даній галузі вчених та самостійної розробки на їх основі функціональних схем модулів локальної системи вимірювань величини ПСТ та математичних моделей основних конструктивних частин абсолютного БГ, що передбачають обробку отриманих даних на ЕОМ.

Як зазначалось вище, головним напрямком розробок є підвищення точності результатів вимірювання БГ, за рахунок удосконалення системи автоматизації обробки результатів та розробка системи відеоспостереження за процесом отримання інформації, що також повинно усунути похибки та забезпечити максимальну точність вимірювання. Саме такий БГ було створено на базі Національного технічного університету "КПІ" та Житомирського державного технологічного університету, точність вимірювань ПСТ якого (0,1 мкГл) у 5 разів вища, у порівнянні з відомими БГ (0,5 мкГл).

Список літературних джерел::

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень: Підручник. – К., Либідь, 2001. – 264.
2. *Бондарев С.С. и др.* Экспериментальные исследования баллистических гравиметров. – Метрология, 1986, №1.
3. *Волосов С.С., Марков Б.Н., Педь Е.И.* Основы автоматизации измерений. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 368 с.
4. *Грушко И.М., Сиденко В.М.* Основы научных исследований. – Харьков: Вища школа, 1983.
5. *Попов Е.И.* Определение силы тяжести на подвижном основании. – М.: Наука, 1987. – 218 с.
6. *Юзефович А.П., Огородова Л.В.* Гравиметрия. – М.: Недра, 1980.