

УДК 621.317

¹ О. М. Безвесільна, д.т.н, професор

² А. А. Остапчук, к.т.н

³ В. А. Хоречко, магістрант

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПРИЦП РОБОТИ БАЛІСТИЧНИХ ГРАВІМЕТРІВ

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
e-mail: bezvesilna@mail.ru

^{2,3} Житомирський державний технологічний університет,
e-mail: post_base@mail.ru

У статті проведено аналіз існуючих на сьогоднішній день типів балістичних гравіметрів та опис принципу їх роботи.

Ключові слова: балістичний гравіметр, прискорення сили ваги.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність

Вимірювання абсолютного значення прискорення сили ваги (ПСВ) з високою точністю необхідне для успішного розв'язання широкого спектру наукових задач: визначення форми Землі, побудови моделей руху глибинних мас, оцінки пружних деформацій поверхні планети, передбачення землетрусів, пошуку покладів корисних копалин та інше. Для вирішення цих важливих наукових задач призначені гравіметри. Серед них найбільш відомими для наземних вимірювань є балістичні гравіметри (БЛГ).

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.

Найбільш точними є наземні балістичні лазерні гравіметри (0,01 мГл). Однак, вони не автоматизовані, мають низьку швидкодію. Для сучасного використання такі низькі точність та швидкодія неприпустимі [1]. Тому актуальним є дослідження можливості підвищення точності та швидкодії балістичного гравіметра.

Метою статті є проведення аналізу існуючих на сьогоднішній день типів балістичних гравіметрів та опис принципу їх роботи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Балістичний метод вимірювання сили ваги 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 вільного падіння.

Найбільш перспективним із погляду підвищення точності, є вимірювання методом вільного падіння тіл. У цьому випадку прискорення сили тяжіння визначають безпосередньо використовуючи природні одиниці довжини й часу: вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється інтерферометром (мірою служить довжина хвилі лазера), а вимірювання часу – прецизійним стандартом частоти [2]. До появи лазерів при метрологічних, геофізичних і геодезичних вимірюваннях гравітаційного поля Землі застосовували гравіметри, принцип дії яких заснований на використанні маятника, пружинних ваг або вільно падаючого тіла. Точність вимірювань таких гравіметрів оцінюється величиною порядку 10^{-4} – 10^{-5} . За останні 10 років значно поліпшені характеристики не тільки відносних, але й абсолютних гравіметрів. Абсолютні гравіметри забезпечують точність порядку 1 мкГл. Наприклад, створений абсолютний балістичний гравіметр FG5 із точністю 1 мкГл. Особливо точні гравіметричні прилади для проведення фундаментальних фізичних досліджень, як правило, проектується в криогенному виконанні з використанням лазерної інтерферометрії. Ці прилади використовуються при спостереженнях опорних гравіметричних пунктів, рішенні завдань геодинаміки, створенні державного спеціального еталона (групового) одиниці вимірювання для гравіметрії, створенні еталонних полігонів для калібрування відносних гравіметрів.

Створення досконалих вимірювачів переміщень, для балістичних гравіметрів, стало можливим після винаходу лазерів, які володіють високою монохроматичністю та когерентністю. Застосування лазерів дозволяє реалізувати спосіб визначення порядку інтерференції методом динамічного підрахунку інтерференційних смуг [1-2].

Оптична схема установки подібного характеру показана на рис. 1. При переміщенні відбивача на

вимірювальну довжину, так як при скануванні оптичної різниці ходу, визначають кількість періодів модуляції, що залежить від швидкості сканування та від довжини хвилі джерела випромінювання, яка для He-Ne лазера складає 0,633 мкм. Висока частота повторення інтерференційних смуг обумовлює використання фотоелектричного способу їх реєстрації.

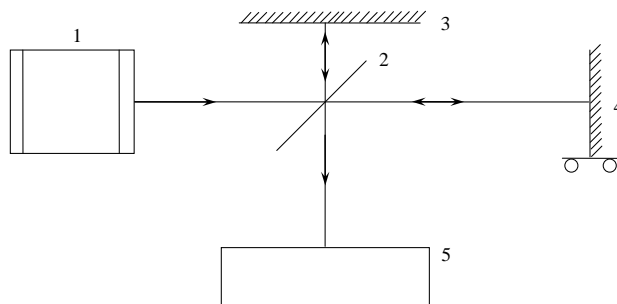


Рис. 1. Принципова схема лазерного вимірювача переміщень: 1 – лазер; 2 – світло-подільна пластинка; 3 – дзеркало; 4 – рухомий відбивач; 5 – реєстраційний пристрій

Таким чином, широке впровадження у вимірювальну техніку лазерів та фотоелектричних перетворювачів, які модулюють світловий потік в електричні сигнали дозволило створити цілий ряд конструкцій лазерних вимірювачів переміщень. Основними перевагами яких є:

- підвищення точності вимірювань;
- скорочення часу вимірювань;
- автоматизація вимірювального процесу;
- зниження рівня підготовки обслуговуючого персоналу.

Конструктивні особливості цього типу приладів достатньо повно можна охарактеризувати на прикладі інтерферометра ІПЛ (інтерферометр переміщень лазерний), схему якого наведено на рис. 2. Виходячи з лазера 1, пучок променів спрямовується призми 2 і 3 на телескопічну систему 4, відбивається від грані призми 5 та розподіляється пластиною 6 з напівпрозорою поверхнею на два пучки. Робочий пучок, що пройшов через цю пластину, падає на рухому “трипель-призму” 7. Відбивається від граней призми 7 та з’єднується другою напівпрозорою пластиною 8 з пучком порівнянь, що відбився від поверхні пластини 6. Обидва пучки частково направляються на фотоприймач 10, а частково, після відображення від грані призми 5 - на фотоприймач 12.

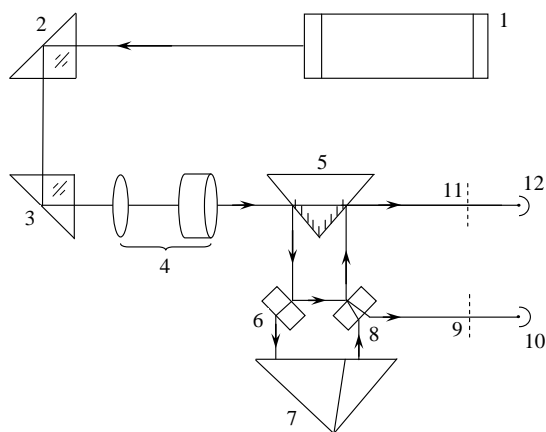


Рис. 2. Лазерний інтерферометр ІПЛ

Однак, схема цього приладу не позбавлена недоліків. По-перше, інтерферуючі пучки перевернуті по відношенню один до одного. Ця особливість, неприпустима в інтерферометрах зі звичайними джерелами світла. При використанні лазерів це знижує контрастність інтерференційної картини, погіршує її стабільність. З плином часу можливі невеликі зміни напрямку пучка променів, що входять в інтерферометр. Це призводить до зміни ширини та орієнтації смуг. До такого ж результату призводять можливі навіть малі розбіжності у нахилах пластин 6 і 8. По-друге, наявність тільки однієї “трипель-призми” робить обидва пучки променів різно-поляризованими. Це ще більше знижує контрастність інтерференційної картини.

Ці недоліки відсутні в конструкціях таких вимірювачів переміщень, як інтерферометр фірми “Браун-Бовері” (Braun-Boveri), схему якого наведено на рис. 3, та інтерферометр фірми “Тейлор-Хобсон” (Taylor-Hobson) [4].

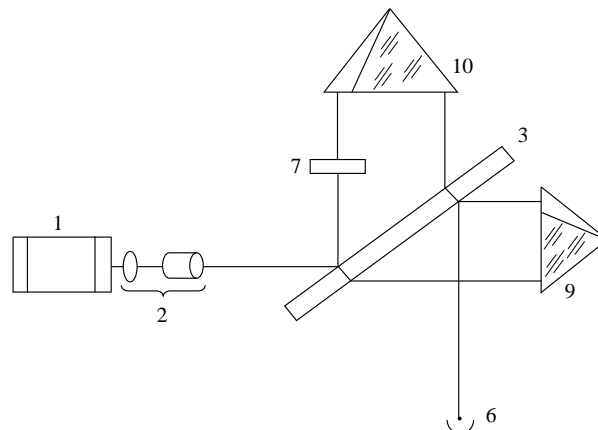


Рис. 3. Лазерний інтерферометр фірми “Браун – Бовері”

Як видно з рис. 3, паралельний пучок променів, що виходить з лазера 1, направляється телескопічною системою 2 та поділяється пластиною 3 на два пучки, які падають на рухому 9 та нерухому 10 “трипель-призми”. Далі пластина 3 з’єднує відбиті пучки променів та спрямовує їх на фотоприймач 6. Відмінною особливістю інтерферометра є наявність кутових відбивачів в референтному та робочому плечі, що підвищує контрастність інтерференційної картини (підвищуючи тим самим глибину модуляції вихідного світлового потоку) та наявність клиноподібної пластини 7, орієнтація якої визначає ширину та напрямок смуг. Вказані заходи підвищують рівень вихідного сигналу, знижуючи тим самим вимоги до фотоелектричного блоку.

У наведених вище конструкціях інтерферометрів похибка вимірювань довжини визначається похибкою відліку інтерференційних смуг і є значною.

Суттєво покращити метрологічні характеристики інтерферометра дозволила установка Трофімова. В цій установці підвищення точності вимірювання досягається за рахунок визначення довжини з точністю до 0,03 долі інтерференційної смуги. Для цього фотоелектричний блок, який перетворює світловий потік від інтерференційної картини в електричні сигнали, виконується у вигляді чотириканальної системи. Він містить чотири фотоприймача, аналізуючі діафрагми, які розташовані в площині інтерференційної картини. З сигналів формуються лічильні імпульси з дискретністю, яка дорівнює $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/32$ довжини хвилі джерела світла. Необхідна дискретність відліку переміщення задається до початку вимірювання.

Підвищення точності більш простими засобами досягається в інтерферометрі фірми “Кетлер-Хаммер” (Ketler-Hammer) [4], у якому чутливість подвоюється завдяки двократному відбиттю пучка променів від рухомої “трипель-призми”.

Недоліком інтерферометра є те, що вихідний з нього пучок променів частково повертається в лазер і, тим самим, перешкоджає стабілізації його роботи.

Загальна властивість наведених вище схем: положення рухомого тіла визначається відносно опорного плеча. Місце останнього, в силу різних збурюючих впливів (зміна температури, вібрації та інше) може змінюватись, що призводить до виникнення похибки при вимірюванні шляху.

Тому, при використанні інтерферометрів в балістичних гравіметрах, стикаються з проблемами. Балістичні гравіметри роблять в складних кліматичних умовах і при великих збурюючих прискореннях. Крім цього вони повинні бути компактними, легкими та зручними в роботі, доступними для обслуговування персоналом.

Схема, що зображена на рис. 4, використовується у лазерних датчиках шляху, що працюють у складі польового гравіметра. Вона відрізняється од відомих аналогів тим, що зсув фази в приймальних каналах досягається взаємним поворотом аналізаторів, що виділяють інтерферуючі пучки з двох циркулярно-поляризованих в протилежних напрямках хвиль. Циркулярна поляризація відбувається за допомогою паралелепіпеда Френкеля. Зворотній зв’язок (33) з лазерним резонатором усувається геометричною побудовою схеми, так як і в інтерферометрі, який зображено на рис. 4.

Схема, яку приведено на рис. 5, використовується в лазерному датчику шляху, який працює в умовах значних вертикальних прискорень та дозволяє використовувати динамічний поглинач для компенсації вертикальних прискорень. Схема побудована таким чином, що демпфувальний та робочий кутові відбивачі знаходяться на одній вісі, що є віссю симетрії лазерного датчика шляху. При такому розташуванні компенсуючого плеча в момент нахилу не створюється додаткова вертикальна сила.

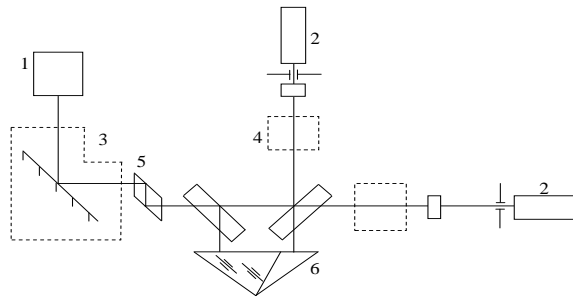


Рис. 4. Схема оптична, принципова лазерного балістичного гравіметра: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллімирующая” оптична схема; 4 – фокусуюча оптична схема; 5 – паралелепіпед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

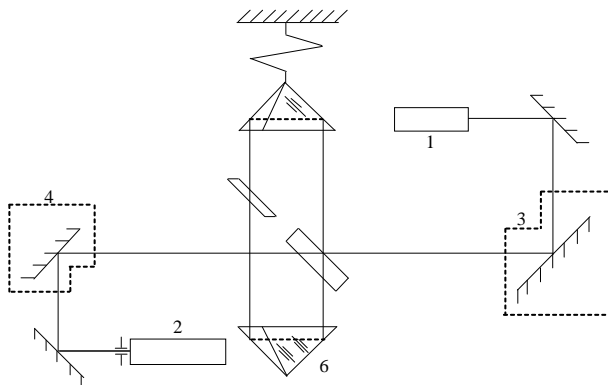


Рис. 5. Лазерний датчик шляху балістичного гравіметра: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллімирующая” оптична схема; 4 – фокусуюча оптична схема; 5 – паралелепіпед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

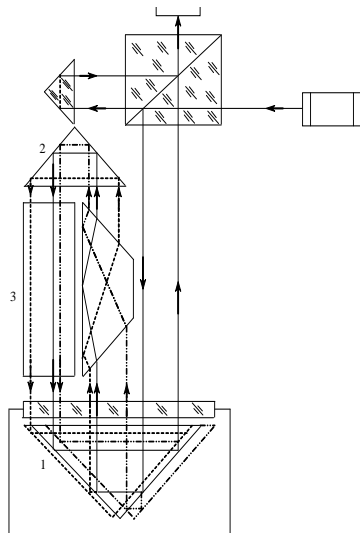


Рис. 6. Пристрій для вимірювання абсолютного значення ПСВ: 1 – лазер; 2 – фотоприймач; 3 – “коллімирующая” оптична схема; 4 – фокусуюча оптична схема; 5 – паралелепіпед Френкеля; 6 – кутовий відбивач

електромагніта (не симетричний рух). Джерелом світла служить газовий (гелій-неоновий) лазер, вимірювання шляху, пройденого падаючим тілом, здійснюється інтерферометром (мірою служить довжина хвилі лазера), а вимірювання часу – прецизійним стандартом частоти.

Негативним явищем наведених лазерних датчиків шляху балістичних гравіметрів є те, що повне усунення похибок лазерного резонатора можливо лише при точному виготовленню ромба Френкеля, а це є дуже складною задачею практичної реалізації. Вказаний недолік усунено в пристрої для вимірювання абсолютного значення прискорення сили ваги, схема та принцип роботи якого наведено на рис. 6. Цей пристрій відрізняється тим, що для компенсації зміщень кутового відбивача 1 застосовується обертаюча оптична система в складі ще одного кутового відбивача 2 та призми 3.

Як видно із наведеного огляду, у склад БЛГ входять:

- інтерферометр, який призначено для перетворення часово-просторових параметрів руху пробного тіла в електричний сигнал;
- вимірювач шляху та часу;
- балістичний блок, в якому реалізується вільний рух пробного тіла;
- прилад врахування або компенсації зовнішніх інерційних перешкод;
- прилад автоматики та управління роботою гравіметра;
- система оперативного контролю працездатності й індикація відмов;
- система контролю та підтримки вакууму;
- система горизонтування;
- ЕОМ;
- блок живлення.

Кожний із структурних елементів конструктивно оформлюється у вигляді окремого блоку. На рис. 7 наведено спрощену схему одного з сучасних гравіметрів, що працюють за симетричним методом.

Як вільно падаюче пробне тіло 9 звичайно використовують кутову відбиваючу призму. У залежності від способу вимірювання пробне тіло або підкидається пусковим пристроєм 8 (симетричний рух), або відпускається магнітним пристроєм, що втримує пробне тіло у верхній частині вертикального плеча інтерферометра за допомогою

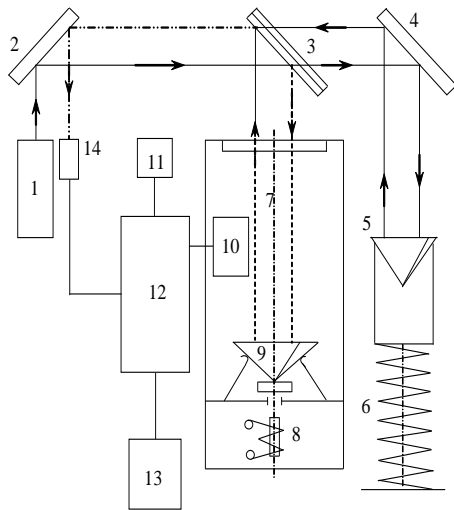


Рис. 7. Схема БЛГ: 1 – лазер; 2 – дзеркало інтерферометру; 3 – світлорозподільча поверхня (прозоре дзеркало); 4 – дзеркало сейсмографа; 5 – закріплений кутовий відбивач сейсмографа; 6 – довгоперіодичний сейсмограф; 7 – вакуумна камера; 8 – пусковий пристрій; 9 – пробне тіло (кутова відбиваюча призма); 10 – манометр; 11 – генератор міток часу; 12 – мікро-ЕОМ; 13 – цифродрук; 14 – фотоприймач.

ЕОМ 12, де доводяться до придатності для обчислення абсолютного значення g .

Для врахування впливу рухів земної кори, зменшення впливу вібраційних і сейсмічних перешкод референтний (нерухомий) відбивач 5 лазерного інтерферометра підвішений у центрі хитань низькочастотного сейсмографа 6. Для зменшення впливу обертання пробного тіла (призми) 9 пристрій конструюють таким чином, щоб його центр тяжіння збігався з оптичним центром. Для виключення впливу тертя повітря пробне тіло 9 поміщають у вакуумну камеру 7.

Шлях, пройдений вільно падаючим тілом, визначається числом смуг. Число смуг N пов'язане з різницею ходу променів Δ і довжиною хвилі світла λ співвідношенням $\Delta = N\lambda$. Ширина та число інтерференційних смуг залежать від спектрального складу джерела світла та різниці оптичних шляхів світлових пучків.

Частота f проходження інтерференційних смуг залежить від швидкості $V \sim gt$ руху відбивача й пов'язана з v співвідношенням: $f = \frac{2V}{\lambda}$, де λ – довжина хвилі випромінювання.

Висновки. Наведено класифікацію існуючих БЛГ. Ідентифіковано основні складові елементи БЛГ: інтерферометр, який призначено для перетворення часово-просторових параметрів руху пробного тіла в електричний сигнал; вимірювач шляху та часу; балістичний блок, в якому реалізується вільний рух пробного тіла; прилад врахування або компенсації зовнішніх інерційних перешкод; прилад автоматики та управління роботою гравіметра; система оперативного контролю працездатності й індикація відмов; система контролю та підтримки вакууму; система горизонтування; ЕОМ; блок живлення. Описано принцип роботи БЛГ.

Література:

4. Безвесільна О. М. Гравіметри та їх виставка: монографія / О.М. Безвесільна, А.А.Остапчук, С.С. Ткаченко. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 307с.
5. Безвесільна О.М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / Безвесільна О. М. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
6. Балістичний гравіметр: Рішення про видачу патенту на винахід №4359/3А/12 від 21.02.2012 р. , МПК G 01 V 7/00 / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.А.Остапчук.
7. Безвесільна О. М. Тенденції розвитку та аналізу сучасного стану балістичної гравіметрії/ О. М. Безвесільна, Остапчук А.А. Гура Є.В.// Вісник Інженерної академії України – №2, 2012. – С. 34-39.