

УДК 528.563

ЮСТИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЛУЧА ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПО ВЕРТИКАЛИ В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ

© Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, Д. А. Носов, И. С. Сизиков

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: stus@iae.nsk.su*

Представлено описание метода выставления вертикали контроля смещения блика измерительного луча для абсолютных лазерных баллистических гравиметров. Данный метод базируется на регистрации видеокамерой траектории смещения измерительного луча, отражённого от уголкового отражателя в процессе свободного падения тела. Определялись величины и направления угла отклонения измерительного луча от вертикали с помощью покадровой обработки полученной видеозаписи. Экспериментально установлено, что погрешность выставления вертикали не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ рад.

Ключевые слова: абсолютное измерение силы тяжести, лазерный баллистический гравиметр, выставление вертикали, интерферометр.

DOI: 10.15372/AUT20200304

Введение. В настоящее время для измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести g наиболее точным и перспективным является баллистический метод. Он основан на принципе свободного падения пробного тела в вакууме с интерферометрическим определением параметров его движения [1].

Одна из важных составляющих при подготовке баллистического гравиметра к измерению — выставление лазерного луча вдоль местной вертикали, при этом погрешность выставления не должна превышать $4 \cdot 10^{-5}$ рад (примерно 9 угл. с) [2]. На сегодня одним из самых распространённых способов выставления лазерного луча является метод, основанный на использовании отражённого луча от поверхности жидкости [3]. К недостатку этого метода следует отнести высокую чувствительность к вибросейсмическим помехам, вызывающим колебания её поверхности. Кроме того, контроль вертикальности луча возможен только при статическом положении свободно падающего тела гравиметра. Существует ещё один способ выставления вертикали — по электронным уровням. Но настройка (в данном случае установка нуля) датчиков производится по тем же жидкостным зеркалам в лабораторных условиях, что приводит к вышеописанным проблемам. Переместив гравиметр с лабораторного пункта, на котором была проведена настройка, в условия с другой внешней температурой, нельзя гарантировать стабильность нуля отсчёта датчика наклона. Важно отметить, что для развития фундаментальных и прикладных геофизических исследований остро стоит задача определения абсолютного значения g в условиях внешней среды (в полевых условиях). А это свидетельствует о непригодности (или, по крайней мере, об огромной сложности реализации) вышеописанных способов выставления вертикали баллистических гравиметров в таких условиях для достижения требуемой точности (первых единиц мкГал).

Для решения проблемы предложен новый метод выставления вертикали [4], основанный на регистрации высокоскоростной видеокамерой траектории смещения измерительного луча, отражённого от уголкового отражателя в процессе свободного падения пробного тела. Этот метод позволяет не только выставлять лазерный луч вдоль местной отвесной линии в процессе свободного падения пробной массы под действием силы тяжести, но и

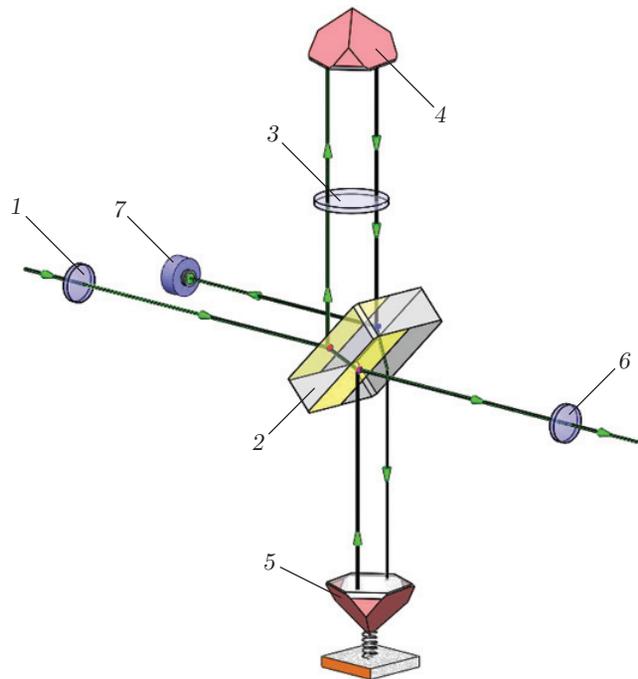


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема интерферометра

вести контроль отклонения от вертикальности во время всего сеанса измерений гравиметра (порядка 2–4 ч), учитывать горизонтальное смещение падающего тела, связанное с боковым импульсом в момент отрыва от удерживающего устройства. При определении значения отклонения от вертикали и величины горизонтального смещения тела появляется возможность вести отбраковку отдельных бросков, не подошедших по одному из этих параметров. Также данная схема позволит полностью автоматизировать процесс (а это очень важно для оператора гравиметра в полевых условиях) настройки вертикали и вести контроль совмещения рабочего и опорных лазерных лучей в интерферометре. Для реализации этого метода была доработана схема лазерного интерферометра.

Интерферометр. Для реализации метода выставления вертикали по контролю смещения блика измерительного луча для абсолютных лазерных баллистических гравиметров была разработана оптическая схема интерферометра (рис. 1).

Излучение оптического стандарта длины вводится в интерферометр гравиметра с помощью оптического волоконного кабеля и после прохождения коллиматора 1 направляется на лучеделитель 2, который выполнен в виде стеклянной плоскопараллельной пластины, имеющей с двух сторон светорасщепляющее напылённое покрытие. Лазерное излучение попадает на напылённую часть лучеделителя, где разделяется на два луча. Половина излучения проходит сквозь стекло до следующей лучеделительной поверхности и является опорным плечом, а вторая половина, отразившись от передней грани лучеделителя, направляется через входное окно вакуумной камеры 3 на уголкового отражателя 4, установленный в свободно падающем теле гравиметра. Обратный луч проходит через прозрачную (ненапылённую) часть пластины и попадает на референтный уголкового отражателя 5. После отражателя излучение направляется на напылённую часть лучеделителя, где оно рекомбинирует на втором его покрытии с опорным лучом. Образующееся интерференционное поле попадает через выходной коллиматор 6 по оптоволоконному кабелю на фотоприёмник. Информация об отклонениях от вертикали и величине горизонтального смещения получается за счёт регистрации высокоскоростной видеокамерой 7 положения отражённо-

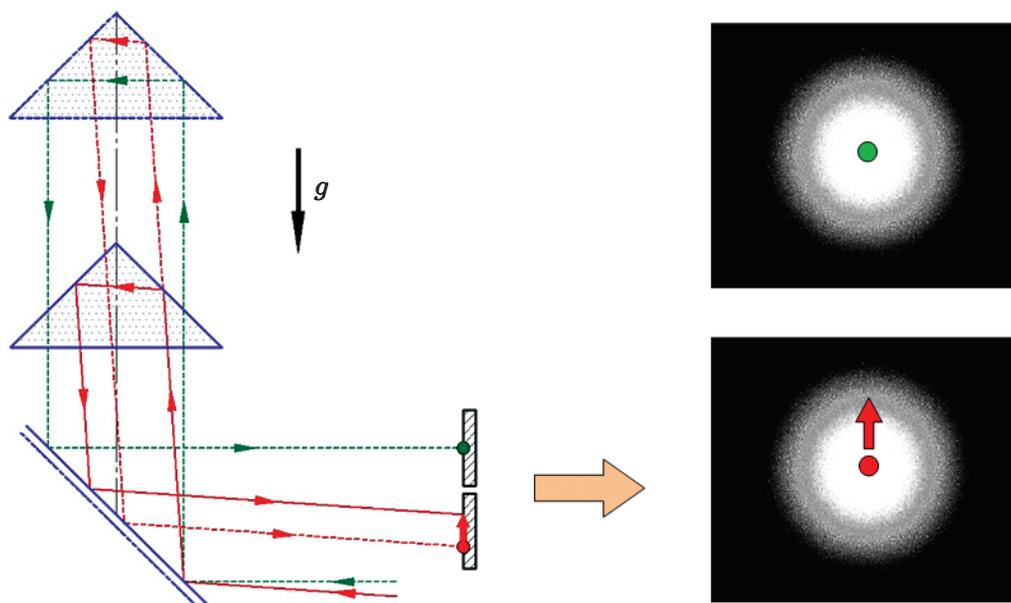


Рис. 2. Ход лучей в оптической схеме баллистического гравиметра при отклонении измерительного луча от вертикали и при их совпадении

го от чистой рабочей поверхности плоскопараллельной пластины части излучения, идущего из уголкового отражателя. Информация с видеокamеры передаётся непосредственно на управляющий компьютер.

Контроль выставления вертикали. На рис. 2 представлена схема хода лучей в баллистическом гравиметре.

Если направление луча совпадает с вертикалью, то луч, приходящий из уголкового отражателя во время его свободного падения, всегда попадает в одну и ту же точку. Если направление рабочего луча не совпадает с вертикалью, то приходящий луч при свободном падении уголкового отражателя смещается относительно начального положения. Соответственно изображение блика на видеокamере в первом случае остаётся неподвижным, а во втором — движется равноускоренно.

Обработка видеозаписи. Определение величины и направления угла отклонения измерительного луча от вертикали производится с помощью покадровой обработки видеозаписи, полученной в процессе движения свободнопадающего тела. Для анализа видеоданных была разработана специальная программа, с помощью которой определяются кадры, соответствующие началу движения тела и моменту касания им улавливающего устройства.

Моментом ухода тела в ловушку считается момент критичного изменения формы пятна (изображения измерительного луча на кадре видеозаписи), связанного с быстрыми (относительно длительности выдержки видеокamеры) процессами вращения и изменения положения тела после касания улавливающего устройства (рис. 3).

Отклонение формы пятна от исходной рассчитывается по суммарной яркости контрольных маркеров, расположенных на границе пятна. Для задания геометрического расположения границы пятна и контрольных маркеров вычисляются координаты центра тяжести (яркости) O и средний радиус пятна R (рис. 4). Контрольные маркеры располагаются на восьми лучах, выходящих из центра пятна, на расстоянии среднего радиуса от центра яркости пятна. Всего восемь маркеров, представляющие собой квадраты размером 16×16 пикселей.

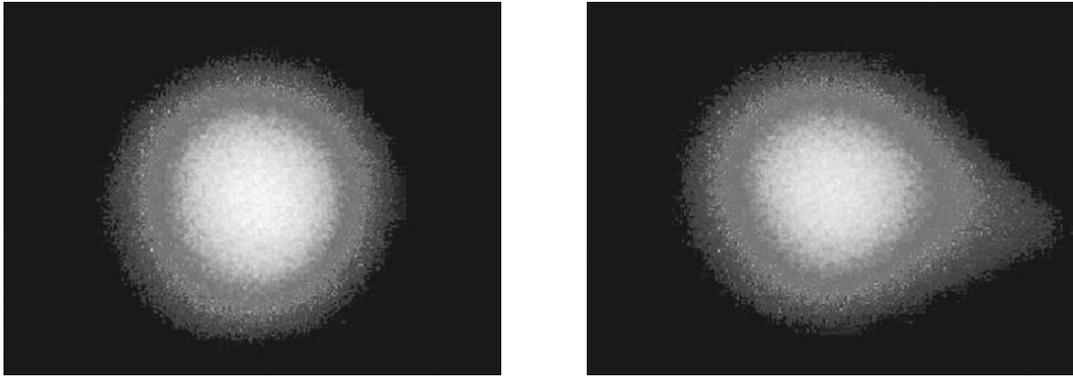


Рис. 3. Изменение формы пятна при попадании тела в улавливающее устройство

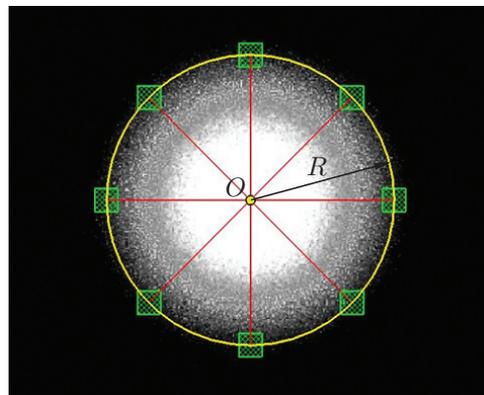


Рис. 4. Расположение маркеров для определения момента ухода падающего тела в ловушку

Определив момент ухода пробного тела в улавливающее устройство и учитывая время его падения и скорость записи видеокамеры, программа вычисляет кадр, соответствующий началу движения падающего тела.

Сравнив координаты центра тяжести пятна начального и конечного кадров, программа показывает величину и направление смещения пятна (рис. 5). Также в окне программы отображается рекомендуемое количество шагов актуаторов и их направления, с помощью которых измерительный луч выставляется по вертикали в гравиметре [4].

Анализ и отбраковка единичных измерений (бросков). Падающее тело движется в баллистическом блоке гравиметра равноускорено в поле силы тяжести, соответственно уравнение движения пятна в процессе падения можно записать в виде

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t + \mathbf{g} t^2 / 2. \quad (1)$$

Приняв центр пятна начального кадра за начало отсчёта системы координат и предположив, что начальная скорость \mathbf{v}_0 равна нулю (в стартовом положении тело зафиксировано), уравнение (1) преобразуется в

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} t^2 / 2.$$

Перемещение пятна может быть связано не только с движением тела в поле силы тяжести, а также с импульсом, получаемым при отрыве пробного тела, связанным с силой реакции опоры, причинами которой являются: сила электромагнита, удерживающего

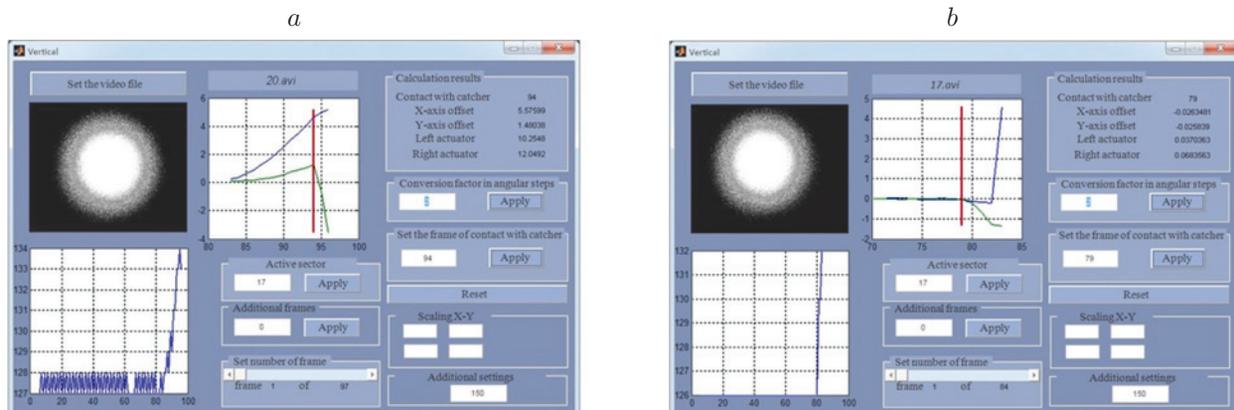


Рис. 5. Интерфейс программы выставления вертикали баллистического гравиметра: *a* — вертикаль расстроена, *b* — вертикаль настроена

в начальном положении падающее тело, и неустойчивость гравиметрических измерительных пунктов, расположенных в зонах с повышенной сейсмоактивностью (как естественной, так и техногенной). Соответственно линейная часть уравнения v_0t далеко не всегда равна нулю. Сильные боковые импульсы являются причиной расхождения опорного и измерительного лучей (вследствие горизонтального смещения падающего тела), возникновения вращения падающего тела и ошибки в выставлении измерительного луча по вертикали.

Всё это приводит к увеличению погрешности при определении значения ускорения свободного падения [3]. Поэтому возникает необходимость проводить покадровый анализ качества каждого броска.

Определив центр пятна, специальная программа записывает его координаты. Затем во время падения фиксируется изменение координат центра в виде массива данных $[X_i, Y_i]$. По этому массиву строится кривая зависимости координаты от времени, уравнение которой является полиномом 2-го порядка:

$$P_2(x, y) = P^1(x, y) + P^2(x, y), \tag{2}$$

где $P^1(x, y)$ и $P^2(x, y)$ — линейный и квадратичный члены, соответствующие вышеописанному боковому импульсу и влиянию силы тяжести.

Для корректного выставления вертикали из полинома (2) необходимо исключить линейную часть и рассматривать только квадратичную. По полученному таким образом полиному строится новая кривая и определяется степень отклонения пятна:

$$P_2(x, y) = P^2(x, y). \tag{3}$$

Сравнив координаты центра пятна начального и конечного кадров, программа определяет величину и направление смещения пятна.

Аналогичным образом, исключив квадратичную часть из полинома (2), программа определяет величину горизонтального смещения тела в процессе падения, а соответственно и силу бокового импульса.

Итак, в процессе анализа формируется всего три параметра, которые характеризуют качественно каждый единичный бросок (в сеансе измерений, как правило, около 1000 единичных бросков):

- величина горизонтального смещения тела в процессе падения;
- величина отклонения от вертикали измерительного луча;
- суммарное смещение.

Задав определённые критерии (допустимые значения величин смещений пятна) по этим трём параметрам, программа проводит отбраковку бросков, разделив их на «хорошие» и «плохие» и сгруппировав в новые массивы только «хорошие», пересчитывает значение ускорения свободного падения. Функция отбраковки единичных бросков работает в трёх режимах:

- допустимые значения величин смещений пятна вводятся вручную;
- допустимые значения величин смещений пятна определяет сама программа, исходя из среднего значения этих величин и минимального допустимого количества бросков в серии;
- функция отключена.

Заключение. Описанный метод выставления вертикали по контролю смещения блика измерительного луча позволяет не только выставлять лазерный луч вдоль местной отвесной линии в процессе свободного падения пробной массы под действием силы тяжести, но и вести контроль отклонения вертикали во время всего сеанса измерений гравиметра, учитывать горизонтальное смещение падающего тела, связанное с получаемым при отпуске боковым импульсом, выполнять отбраковку единичных бросков, задав допустимые значения величин смещения блика измерительного луча. Такая функция отбраковки даёт возможность повысить точность (или уменьшить время) измерения ускорения свободного падения при работе на неустойчивых гравиметрических пунктах, расположенных в зонах с повышенной естественной и техногенной сейсмоактивностью. Данный метод удобен ещё и тем, что позволяет проверять вертикальность луча непосредственно во время проведения измерений, не прерывая работу гравиметра. Экспериментальная проверка показала, что погрешность выставления вертикали не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ рад.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117052210002-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнаутов Г. П., Калиш Е. Н., Смирнов М. Г. и др. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // Автометрия. 1994. № 3. С. 3–11.
2. Юзефович А. П. Гравиметрия. М.: Недра, 1980. 320 с.
3. Стусь Ю. Ф. Разработка и исследование оптической системы лазерного баллистического гравиметра. Новосибирск, 2002. 108 с.
4. Пат. 2498356 РФ. Способ выставления вертикали лазерного луча в баллистическом гравиметре и устройство для его осуществления /Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, Д. А. Носов, И. С. Сизиков. Опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31.

Поступила в редакцию 24.09.2019

После доработки 11.11.2019

Принята к публикации 12.11.2019