

УДК 520.9

А. Ф. Пугач, Д. П. ВоробьевГлавная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27**Устройство для регистрации положений
коромысла сверхлегких крутильных весов**

Разработано, собрано и проверено практикой астрономических наблюдений устройство для регистрации положений коромысла сверхлегких крутильных весов, дающее возможность полностью автоматизировать процесс наблюдений при постоянном мониторинге результатов измерений в реальном времени. Осуществлен принцип цветового разделения неподвижных меток, задающих меридиональное направление, от подвижного маркера за счет использования разных люминесцентных красок и источника УФ-излучения. В отличие от других систем регистрации подобного типа, изготовленная установка позволяет минимизировать конвективные потоки воздуха внутри камеры крутильных весов и существенно повысить точность автоматического определения направления коромысла, при котором погрешность единичного определения равна $\pm 0.172^\circ$. Проведенные с данной установкой длительные наблюдения позволили выявить в поведении крутильных весов четкий суточный цикл, природа которого пока остается не выясненной.

ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ПОЛОЖЕНЬ КОРОМИСЛА НАДЛЕГКИХ КРУТИЛЬНИХ ВАГ, Пугач О. Ф., Воробійов Д. П. — Розроблено, зібрано і перевірено практикою астрономічних спостережень пристрій для реєстрації положень коромисла надлегких крутильних ваг, що дає можливість повністю автоматизувати процес спостережень при постійному моніторингу результатів вимірів в реальному часі. Для цього застосовано принцип колірної розділення нерухомих міток, які задають меридіональний напрям, від рухливого маркера за рахунок використання різних люмінесцентних фарб і джерела УФ-випромінювання. На відміну від інших систем реєстрації такого типу, виготовлена установка дозволяє мінімізувати конвективні потоки повітря усередині камери крутильних ваг і істотно підвищити точність автоматичного визначення напрямку коромисла, при якому похибка одиничного визначення становить $\pm 0.172^\circ$. Проведені з даною установкою тривалі спостереження дозволили виявити в поведінці крутильних ваг чіткий добовий цикл, природа якого доки залишається не з'ясованою.

THE DEVICE FOR REGISTRATION OF BEAM POSITIONS OF AN EXTRALIGHT TORSION BALANCE, by Pugach A. F., Vorobiov D. P. — A device for the registration of beam positions of an extralight torsion balance is developed, mounted and tested by practice of astronomical observations. The device allows the observational process to be completely automated under the constant monitoring of measurement results in real time. The principle of colour division of stationary markers setting the meridian direction and a mobile marker is used. For this purpose, different luminescent paints and an UV-radiation source are applied. Unlike other registration systems of this kind, the device described enables one to minimise convective air streams inside the torsion balance chamber and to

raise essentially the automatic reading accuracy for a beam position. An error of individual determination is equal to $\pm 0.172^\circ$. Long-term observations performed with the device allowed us to reveal a clear-cut daily cycle the nature of which remains to be clarified.

Введение. Автоматическая регистрация положения стрелки миниатюрных крутильных весов (КВ) с массой подвижной части менее 1 г задача далеко не простая, поскольку исключает возможность использования подавляющего большинства контактных, дистанционных и оптических датчиков ввиду их относительно большой массы. Обычно применяемая регистрация основана на измерении положения конца коромысла крутильных весов для чего наблюдают отражение светового зайчика от небольшого зеркальца, укрепленного на подвижной части КВ, или используют специальные смотровые окна [1, 3]. Их недостаток очевиден: измерения возможны только лишь в пределах угла поворота стрелки $< 90^\circ$, причем при углах 90° точность измерений резко снижается или сами измерения становятся невозможными.

В недавно опубликованной работе был предложен способ измерения положения стрелки миниатюрных КВ в пределах угла $< 90^\circ$ с контролем результатов измерений в реальном времени. Метод основан на использовании круговой фотодиодной линейки, однако точность отсчетов на таком приборе невелика (около $\pm 5^\circ$), поскольку ограничена количеством и размером задействованных в схеме фотодиодов [2]. Известен другой способ, основанный на получении непрерывной записи последовательных телевизионных изображений стрелки КВ, передаваемых ТВ-камерой, на фоне круговой отсчетной шкалы, разделенной на градусы. Однако этот способ измерений нельзя назвать автоматическим, поскольку он требует визуальной расшифровки записанных изображений и ручной записи результатов.

Описание рабочей установки. В наших экспериментах использовались миниатюрные КВ, масса подвижной части которых менее 0.5 г. Коромысло (или стрелка) весов — это соломинка длиной 110 мм, на одном конце которой (короткое плечо l) подвешен свинцовый груз массой M чуть более 400 мг. На длинном плече L , масса которого m , укреплен подвижный маркер. Коромысло с противовесом подвешено на нити из кокона тутового шелкопряда длиной около 130 мм и средним диаметром d 30 мкм. В этом случае приборная константа кручения C_t имеет достаточно большое значение $C_t \sim (l/d)^2 = 144\,000$. Кроме того, такая конструкция обеспечивает большой коэффициент асимметрии $KA = L/l = 25 \dots 30$.

Описанная подвижная часть крутильных весов крепится внутри корпуса КВ. Корпус КВ представлял собой прозрачный параллелепипед размером 24 × 18 см, изготовленный из стекла толщиной 2 мм. В центре верхней грани параллелепипеда крепилась нить подвеса (обычно нить кокона тутового шелкопряда или синтетическая фильтровая нить), которая несла на себе подвижное коромысло. Изнутри ребра стеклянного параллелепипеда обрабатывались силиконовым герметиком, а снаружи проклеивались липкой лентой. Корпус окружался заземленной металлической сеткой с размером ячеек 1—2 см.

К нижней грани стеклянного параллелепипеда, симметрично относительно ее центра «0», приклеивались метки — два небольших белых кружочка N и S. Во время работы корпус КВ ориентировался так, что направление S — N указывало на север. Стрелка и противовес покрывались черной краской.

На конце длинного плеча подвижного коромысла укреплялся еще один белый кружочек — так называемый подвижный маркер. Поскольку во время работы коромысло (стрелка) КВ описывает круговые движения вокруг точки подвеса (условный центр «0»), то подвижный маркер также совершает круговое движение вокруг этого центра. Задачей исследования было сконструировать и создать автоматическую систему, способную распознавать взаимное положение указанных меток и маркера и определять угловое положение подвижного маркера относительно двух неподвижных меток, задающих меридиональное направление.

Для получения цифрового изображения поля со стрелкой на фоне меток N и S

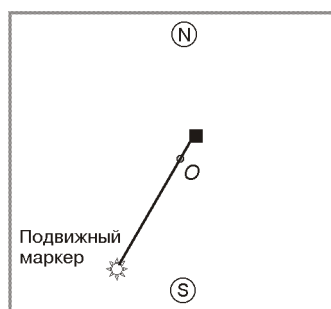


Рис. 1. Схематическое изображение поля зрения, каким оно представляется объективу WEB-камеры (вид сверху)

была использована WEB-камера с разрешением 320 200 пкл. Камера и источники света располагались над верхней гранью корпуса КВ на расстояниях, соответствующих оптическим характеристикам объектива WEB-камеры и световой мощности источника освещения.

Принцип работы. В идеальном случае WEB-камера должна была строить изображение темного поля с тремя белыми пятнами, два из которых никогда не изменяли своего положения относительно жестко связанной с корпусом камеры. Была составлена программа определения углового положения мобильного пятна относительно линии меридиана. Алгоритм программы состоял в следующем.

В прямоугольной системе координат, связанной с WEB-камерой, определялись координаты центров двух неподвижных меток. Это осуществлялось нормированным суммированием координат всех пикселей, на которые попало изображение светлой неподвижной метки. Для каждой светлой неподвижной метки таким образом находились «центр тяжести», и в память компьютера, к которому подключена WEB-камера, записывались координаты центров обеих неподвижных меток. Таким же образом обрабатывалась информация о подвижном пятне с одновременной записью момента времени обработки. Далее специально составленная программа извлекала из памяти компьютера координаты двух неподвижных меток, по ним строила условное направление S — N, а затем находила координаты точки середины вектора S — N, которая априорно считалась совпадающей с проекцией O точки подвеса на нижнюю грань. Далее программа, приняв точку O за центр полярных координат, строила вектор в точку центра масс мобильного маркера и определяла угол между этим вектором и линией меридиана.

Последний этап работы программы — это запись в память компьютера полученного значения (азимут) и соответствующего ему момента времени с последующим построением текущего графика, за поведением которого можно наблюдать в режиме реального времени.

Установка, действующая по описанному выше принципу, показала свою работоспособность и позволила провести не только тестовые, но и научные измерения. В процессе этих испытаний были выявлены некоторые недостатки, существенно ухудшающие рабочие характеристики прибора.

1. Поскольку WEB-камера была расположена над корпусом КВ и «смотрела» внутрь корпуса КВ через стекло (верхняя грань корпуса), то она фиксировала все, что могло отразиться стеклом: источники освещения, саму себя и окружающие предметы (кронштейны камеры и светильника, потолок и т. п.). Это обстоятельство создавало довольно серьезные проблемы в процессе вычленения собственно трех информативных белых пятен на фоне этих помех. Наибольший процент сбоев связан именно с этим недостатком.

2. Для получения высокого контраста «черный фон — белое пятно» требовалось применять относительно мощные источники освещения. Выделяемая ими тепловая и световая энергии прогревали воздух внутри объема корпуса и вызывали конвективные движения воздуха. Эти непрогнозируемые потоки значительно влияли на положение коромысла и заметно искажали результаты измерений.

3. Малейшее смещение WEB-камеры относительно корпуса КА требует переопределения и перезаписи координат центров двух неподвижных меток.

С целью исключения этих недостатков была разработана принципиально новая система регистрации.

Метод цветовой идентификации меток и маркера. Вместо обычных ламп накаливания для освещения меток и маркера была использована УФ-лампа типа

«black light» с эффективной длиной волны излучения 400 нм. Метки и маркер были покрыты разными люминесцентными красками, свечение которых под действием ультрафиолета давало красный, зеленый и синий цвета, а корпус прибора изнутри покрывался черной краской.

Дальнейшая автоматизация стала возможной благодаря использованию цветовых свойств полученного цифрового изображения. Любая цветная точка цифрового компьютерного изображения может быть записана или разложена как суперпозиция трех RGB-компонентов — красного, зеленого и синего. В пространстве так называемого цветового RGB-куба каждый монохроматический цвет в идеальном случае будет характеризоваться точкой с тремя координатами (r_i, g_i, b_i) . Так, например, чистый красный будет иметь параметры $(255, 0, 0)$, чистый зеленый соответственно $(0, 255, 0)$, чистый синий — $(0, 0, 255)$, черный — $(0, 0, 0)$, белый — $(255, 255, 255)$. Всем остальным цветам соответствуют промежуточные значения. В реальности приходится иметь дело не с монохроматическими цветами, а с набором близких цветов. Поэтому в пространстве цветового куба реальные цвета будут задаваться не точкой, а небольшими кубиками с координатами $r_i \pm r_i, g_i \pm g_i, b_i \pm b_i$.

Таким образом, используя RGB-кодировку, цветовое пространство пятна для каждой метки и репера можно описать шестью числовыми параметрами.

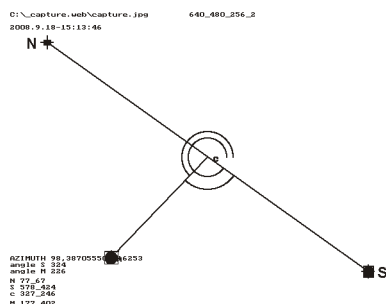
Несмотря на то, что цвета люминисцирующих меток не точно совпадают с монохроматическим красным, зеленым и синим цветами, для трех указанных цветов всегда удается подобрать такие (r_i, g_i, b_i) , что они не имеют в пространстве RGB-куба общих точек, т. е. не пересекаются между собой. Фильтры для каждого цвета точно подбираются перед наблюдениями, и в процессе наблюдений не изменяются, оставаясь постоянными для одного и того же типа прибора и WEB-камеры и постоянном излучении УФ-источника.

На этом принципе основана работа программы по идентификации меток и маркера. Сначала программа строочно сканирует все изображение, построенное WEB-камерой, и находит на нем все точки красного цвета в пределах допуска r_i . Потом программа рассчитывает геометрический центр площадки, построенной из точек красного цвета и записывает координаты этого центра как прямоугольные координаты «южной метки S». Потом то же действие выполняется для точек зеленого цвета и определяется положение «северной метки N». Так же определяются координаты мобильного маркера. Дальнейшие этапы работы программы, включая вычисления положения маркера в полярных координатах и запись результатов измерений, описаны ранее.

Скорость снятия отсчетов можно изменять от 1 ч^{-1} до 1 с^{-1} . Если задана скорость менее 1 мин^{-1} , то программа позволяет без прерывания рабочего процесса выводить на экран монитора последовательность картинок, отображающих процесс отыскания пятен и маркера, геометрические построения, построение радиуса-вектора и определение искомого угла (рис. 2).

При разработке программы работы с цветовыми фильтрами использовались алгоритмы, написанные на FreePascal, а финальный вариант программы исполнен на C++ с использованием библиотек интерфейса Qt и среды разработки CodeBlocks.

Рис. 2. Схематическое изображение положений меток и маркера, которое строится программой при определении угла. Указаны параметры, которые будут занесены в память ПК: имя файла, дата и время, прямоугольные координаты N и S меток, координаты маркера и итоговый результат — значение азимута



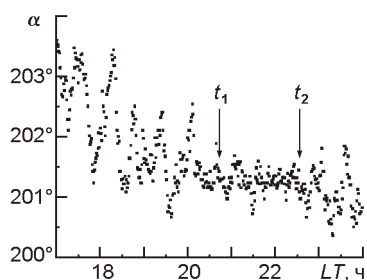


Рис. 3. Фрагмент наблюдений за 18 февраля 2009 г. Для расчета случайной ошибки измерений взят отрезок с минимальными флуктуациями от момента t_1 до t_2

Погрешности измерений

Дата, 2009 г.	Количество измерений	t_1 , ч	t_2 , ч	, град
22 января	97	03.01	04.61	0.1694
29 января	98	06.90	08.51	0.1726
18 февраля	102	20.90	22.56	0.1721
	Среднее значение			0.1713

Точность измерений. Для определения случайной погрешности измерения мы воспользовались предположением, что в ряду непрерывно получаемых отсчетов имеются небольшие интервалы времени, когда внешние воздействия минимальны или вовсе отсутствуют, и все отклонения от среднего значения обусловлены только погрешностью снятия отсчета. Выбирались отрезки, содержащие около 100 непрерывных отсчетов. По сериям таких измерений определялась погрешность.

На рис. 3 показан ограниченный ряд наблюдений в дату 18 февраля 2009 г., в котором наименьший разброс значений наблюдается от 20.90 до 22.56 ч. За это время было получено 102 индивидуальных измерения. Рассчитанная по ним погрешность единичного измерения составила 0.175° (около $10''$). Этот способ дает верхний предел погрешности, поскольку разброс измеренных значений обусловлен не только погрешностью снятия отсчета, но и реальными флуктуациями коромысла.

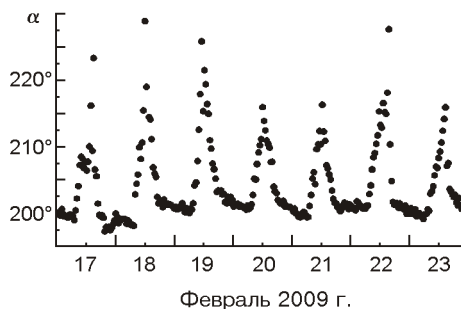
Подобные вычисления были выполнены и по наблюдениям в две другие даты (см. таблицу). Полученное среднее значение 0.1713° будем считать верхней границей погрешности, характеризующей измерения с данной системой, хотя очевидно, что реальная погрешность должна быть намного меньше, поскольку в вычисленное значение вошли флуктуации, не обусловленные погрешностью измерений.

Обсуждение разработки и полученные результаты. 1. Важнейшим достоинством описанного метода идентификации положений меток и маркера является то, что этот метод обладает очень высокой помехоустойчивостью. Дискриминация по цвету обладает тем преимуществом, что WEB-камера «слепа» к разным бликам, отражениям, пятнам на корпусе, она не реагирует на слабый или умеренный рассеянный свет. Она не «видит» ничего, кроме ярких цветных пятен, цвета которых в виде шести числовых параметров координат R-куба оператор задает один раз перед началом первого цикла наблюдений.

2. Другое важное достоинство — простота юстировки WEB-камеры относительно корпуса КВ. Саму WEB-камеру можно в разумных пределах перемещать, поворачивать, приближать или удалять от верхней грани КВ без опасения нарушить юстировку. Если при этом метки и маркер остаются в поле зрения WEB-камеры — программа легко учтет эти изменения. Это важное обстоятельство исключает т.н. «ошибку параллакса», которая играет существенную роль при проведении визуальных наблюдений.

3. Важная особенность описываемой методики работы со сверхлегкими крутильными весами — отсутствие значимой конвекции воздуха внутри корпуса КВ, которая относительно сильна при использовании ламп накаливания. В отличие от последних УФ-лампы или УФ-светодиоды переносят на 1.5—2 порядка меньше теп-

Рис. 4. Результат непрерывной записи сигнала в феврале 2009 г. Четко видны циклические изменения положения стрелки крутильных весов



ловой энергии, что позволяет минимизировать помехи, связанные с конвективными движениями воздуха внутри корпуса КВ.

4. Описываемая установка позволяет получать точность, в несколько десятков раз превышающую точность визуальной или фотодиодной [2] системы регистрации.

Крутильные весы с описываемой системой регистрации на протяжении нескольких месяцев почти непрерывно работали в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины. За это время получены длительные непрерывные ряды наблюдений, анализ которых позволил вывить так называемый «суточный цикл» в поведении сигнала. На рис. 4 показан результат непрерывных измерений в период с 17 по 23 февраля 2009 г. Очевидно периодическое изменение отсчетов крутильных весов, равный 24 ч. При этом в течение нескольких месяцев максимальный отсчет регистрируется именно в полдень по местному времени.

Такая точная и подробная запись стала возможной благодаря использованию описанной выше системы регистрации показаний сверхлегких крутильных весов.

Выводы. Таким образом, изготовленный прибор обладает следующими существенными преимуществами по сравнению с другими моделями миниатюрных КВ.

1. Он позволяет полностью автоматизировать процесс измерений на протяжении длительных периодов времени без участия человека.

2. Погрешность единичного отсчета составляет $\pm 0.172^\circ$, что в несколько десятков раз меньше, чем для прибора, основанного на фотодиодной круговой матрице.

3. За счет применения УФ-источника освещения минимизирован перенос тепла внутри объема корпуса КВ, что позволило снизить влияние внутрикорпусной конвекции воздуха до пренебрежимо малого значения.

4. Возможен оперативный мониторинг событий в режиме реального времени, что важно при регистрации спорадических импульсных флуктуаций.

5. Разработанная схема дает возможность подключать к одному компьютеру четыре WEB-камеры с независимыми системами регистрации.

Указанные особенности позволили при постановке первых же систематических наблюдений обнаружить суточный цикл в положении стрелки крутильных весов, для выяснения природы которого необходимы дополнительные исследования. Обнаружение указанного суточного цикла стало возможно только благодаря созданию такой высокоточной автоматической установки, в которой минимизированы конвективные потоки воздуха внутри корпуса КВ.

1. *Измерения в промышленности* / Под ред. П. Профос: Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1990.— 344 с.
2. Пугач А. Ф., Медведский М. М. Фотозлектронное устройство для отслеживания движения коромысла крутильных весов // *Кинематика и физика небес.* тел.—2009.—**25**, № 3.—С. 234—240.
3. Степанов Н. С., Шишарин А. В. Измерение гравитационной постоянной в учебной лаборатории // *Успехи физ. наук.*—2002.—**172**, № 5.—С. 609—613.

Поступила в редакцию 09.10.09