

УДК 681.786.42

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛАНОВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТЕЛА ПЛОТИНЫ

Бурков А.С., Митрофанов С.С.

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург,
e-mail: rector@mail.ifmo.ru*

Рассматривается вопрос создания нового устройства для контроля плановых смещений тела плотины. Отмечается отсутствие автоматизированных устройств измерения смещения плотины с требуемыми точностными параметрами. Предложен метод построения устройства, состоящий из двух основных блоков: датчика расстояний и углового преобразователя. В качестве первого блока применяется триангуляционный датчик расстояний, отличительной особенностью которого является повышенная точность измерений на необходимом диапазоне расстояний. Создан макет этого блока и выбраны начальные параметры, влияние которых на точность функционирования исследуются. Проведены результаты макетирования, которые показали, что погрешность измерений на всем диапазоне измерений не превышает 0,1%. Эти данные позволяют говорить о возможности создания автоматизированного устройства измерения смещений повышенной точности.

Ключевые слова: плотина, координатомер, триангуляция, контроль положения.

POSSIBILITY TO CREATE AUTOMATED EQUIPMENT TO CONTROL THE SYSTEMATIC DISPLACEMENT OF THE DAM BODY (WEIR BODY)

Burkov A.S., Mitrofanov S.S.

*FSAEI «Saint-Petersburg state research university of information technologies, mechanics and optics», e-mail:
rector@mail.ifmo.ru*

It is being taken into consideration the creation of a new equipment to control the systematic displacement of the dam body. The lack of the automated equipment to measure the displacement of the dam in a required accurate manner is noted. It is offered a new model-building technique which includes two blocks: range-finding sensor and angle beam transducer. Triangulating sensor with a particular accuracy of measuring on a necessary distance range is used as the first block. The block model is created and the initial parameters are chosen. Model estimated value is given, which shows that measurement error at all the range does not exceed 0.1%. This information makes it possible to create a new automated equipment of a particular accuracy to measure the displacement of the dam.

Keywords: dam, coordinate measuring apparatus, triangulation, positional checking.

Плотины гидротехнических сооружений являются объектами повышенной опасности и требуют непрерывного контроля за состоянием их целостности и прочности. В этом плане особую роль представляет контроль плановых смещений тела плотины, который в основном осуществляется измерением смещений контрольных точек, задаваемых положением вертикальных струнных отвесов, установленных в конструкции гидротехнического сооружения на этапе строительства. На сегодняшний день данные измерения проводятся с помощью визуальных измерителей, построенных по схеме Катырева – Брехмана, или же, в меньшей степени (всего несколько плотин ГЭС РФ), с помощью фотоэлектрических установок. В первом случае приборы достаточно громоздки, тяжелы и не свободны от ошибок оператора, во втором – этих проблем нет, но зато устройства – сложные и дорогие. В

обоих случаях точность измерений не превышает 100 мкм, чего не достаточно для точного контроля за плотиной.

Поэтому есть необходимость в создании автоматизированного устройства, свободного от указанных недостатков. Оно должно обеспечивать возможность измерения с одной установки двух координат с точностью, порядка 10 – 50 мкм, при этом не должно содержать сложной механики, быть легким и компактным, простым в эксплуатации и иметь возможность быстрой настройки. Новое устройство должно облегчить процесс измерений, увеличить его точность и тем самым увеличить степень безопасности эксплуатации плотины.

Цель исследования

Целью работы является создание работающего прототипа автоматизированного устройства. Это предполагает решение следующих задач: выбор метода измерений, определение принципа построения будущего устройства, исследование его основных узлов, создание и анализ конструкции. В данной статье рассмотрены первые 3 задачи.

Материал и метод исследования

Для реализации устройства, отвечающего заданным требованиям, был выбран метод определения положения струны в полярной системе координат. В этом случае необходимо знать две величины – расстояние до струны L и угол поворота φ от нулевого положения L_0 до текущего положения струны, и по ним находятся координаты y_{max} и x_{max} (рис. 1).

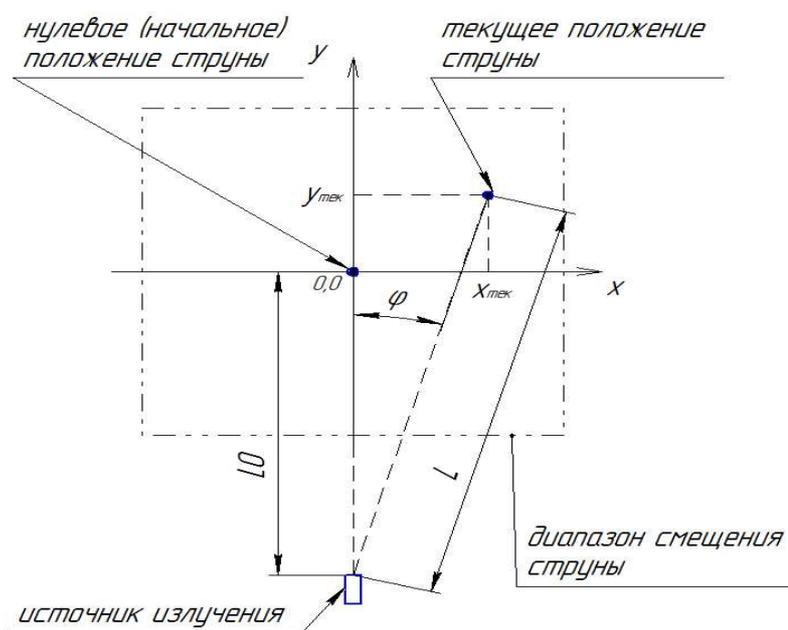


Рис. 1. К пояснению принципа измерения

Наиболее предпочтительным способом измерений является бесконтактный. Поэтому координатомер можно условно разделить на две основные части: первая – это триангуляционный датчик расстояния, а вторая – датчик угла поворота. Триангуляционный метод, на котором основан датчик, выбран потому, что он является одним из

распространенных оптико-электронных методов измерения расстояний до объекта в силу простоты реализации [8]. Принцип измерения заключается в том, что любое изменение положения объекта (в нашем случае это струна отвеса) вызывает соответствующее ему изменение положения изображения объекта, строящегося на фотоприемнике [2]. Используя известные параметры оптической системы, можно вывести формулу, связывающую изменения расстояния до объекта с изменением положения светового пятна на приемнике. Нами была выведена такая формула:

$$\Delta h = \frac{a_0 \cdot \Delta p}{a'_0 \cdot \sin \alpha - \Delta p \cdot \cos \alpha},$$

где Δh – смещение струны, мм, Δp – перемещение светового пятна на приемнике, мм, a_0 , a'_0 – расстояние от главной плоскости объектива приемного канала до струны и плоскости приемника соответственно, мм, α – угол триангуляции, град.

Данная формула значительно проще существующих [5], что впоследствии увеличит скорость обработки данных и, как следствие, быстродействие устройства.

В настоящее время создан макет триангуляционного блока устройства (рис. 2). На этом макете подбираются оптимальные параметры, проверяется целесообразность использования тех или иных компонентов (н-р., необходимость соблюдения условия Шейпфлюта) и исследуется точность работы триангуляционного блока на всем диапазоне смещений струны. Этот блок должен будет обеспечивать измерение смещения струны с погрешностью, не превышающей 50 мкм во всем диапазоне измерений.

При разработке макета автоматизированного устройства были определены следующие параметры триангуляционного блока: угол триангуляции $\alpha = 45^\circ$, задний фокус объектива $f'_{\text{об}} = 18 \text{ мм}$, рабочее расстояние: $a_0 = 150 \text{ мм}$, ПЗС – линейка с размером пикселя 8 мкм. При этом пучок лазерного диода должен иметь гауссовое распределение света и быть отцентрирован таким образом, чтобы перетяжка гауссового пучка была выставлена в центр диапазона измерения [2,3]. Для этого в макете предусмотрена возможность юстировки блока лазерного диода с помощью стойки 5.

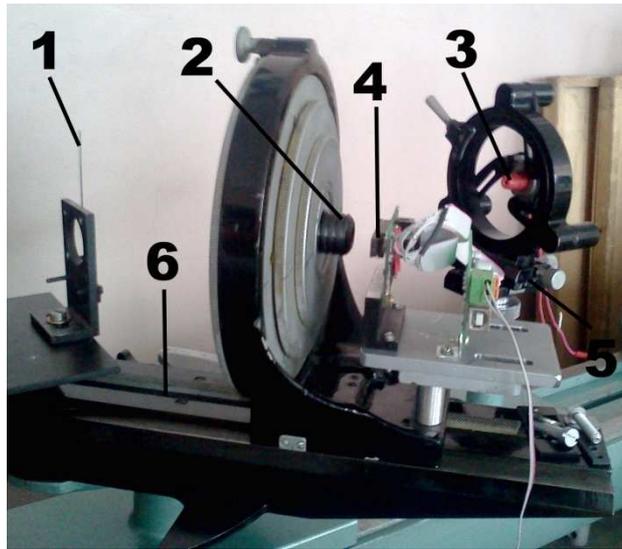


Рис. 2. Макет триангуляционного блока автоматизированного устройства, где: 1 – струна, 2 – объектив приемного канала, 3 – лазерный диод (ЛД), 4 – ПЗС-линейка, 5 – стойка ЛД, 6 – поворотное устройство, с помощью которого устанавливается угол триангуляции

Приемник излучения в координатомере устанавливается под определенным углом (Шейпфлюта) γ к оптической оси собирающего объектива (рис. 3).

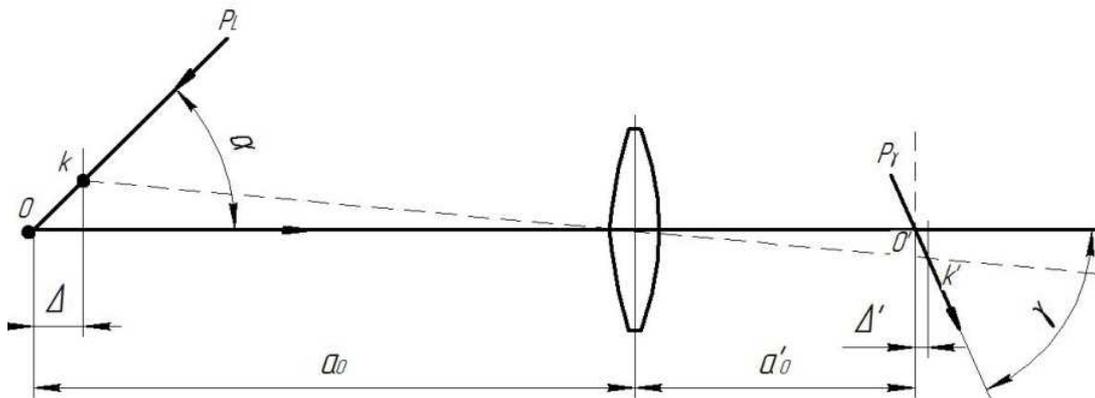


Рис. 3. К пояснению условия Шейпфлюта

Угол γ находится при выполнении условия Шейпфлюта согласно выражению:

$$\tan 2\alpha = M * \tan \gamma, \quad (1)$$

где $M = \frac{a'_0}{a_0}$ – увеличение оптической системы.

Плоскость, проходящая через зондирующий луч, оказывается при этом оптически сопряженной с выходной плоскостью, поэтому любая точка зондирования проецируется в плоскость расположения фотоприемника без каких-либо дефокусировок [5,6].

Для этих целей в установке предусмотрена возможность точного поворота плоскости приемника и подвижки для фокусировки изображения светового пятна. Точность установки

приемника определяется дифракционной глубиной T_D резкости объектива и определяется из выражения

$$T_D = \frac{\lambda}{2 \cdot A} = \frac{0.4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.025} = 0.008 \text{ мм} = 8 \text{ мкм}, \quad (2)$$

где λ – длина волны лазера, A – апертура приемного объектива.

При этом допуск σ на установку угла γ составляет

$$\sigma = 90 - \gamma - \arctan\left(\frac{(L/2) \cdot \cos \gamma}{(T_D/2) + (L/2) \cdot \sin \gamma}\right) = 2.811 \cdot 10^{-3}^\circ = 10'', \quad (3)$$

здесь L – длина светочувствительной части приемника, равная 18 мм.

В качестве проецирующей системы использовался простой фотообъектив с исправленной кривизной поля зрения. Влиянием остальных aberrаций можно пренебречь вследствие малости размера приемника. Сам объектив имеет возможность перемещения для изменения рабочего расстояния (переднего отрезка – от струны до объектива приемной системы).

Для оценки положения изображения светового пятна можно использовать различные алгоритмы, основанные на методах обработки изображений. На эту тему проведены исследования и сделаны предположения о наиболее предпочтительных методах для использования в триангуляционной системе.

Т.к. лазерный пучок имеет гауссово распределение, то мы знаем теоретическую функциональную зависимость светового пятна, поэтому для определения энергетического центра можно использовать метод наименьших квадратов [4,7]. С помощью него происходит поиск теоретической функциональной зависимости, которая предельно близко описывает дискретно полученные значения, т.е. сумма квадратов отклонений значений теоретической зависимости и экспериментально полученных значений минимальна.

Эксперименты проводились следующим образом. На оптической скамье задавалось начальное положение струны и на ПЗС-линейке фиксировалось соответствующее положение светового пятна, вычислялся его энергетический центр и соответствующий ему пиксель линейки; затем струна смещалась вдоль оптической скамьи на определенное расстояние, которое считалось истинным смещением струны, определялся энергетический центр светового пятна во втором положении и вычислялось его перемещение на приемнике; далее по выведенной ранее формуле вычислялось смещение струны. По разнице истинного и расчетного смещений струны определялась абсолютная погрешность измерений.

Результаты исследования

Было проведено 3 серии измерений. Струна перемещалась в диапазоне от нуля до 75 мм. По полученным данным построены графики зависимости абсолютной погрешности

измерений от величины смещения струны (рис. 4 а). Как видно из графиков, полученные результаты имеют достаточно большую степень повторяемости.

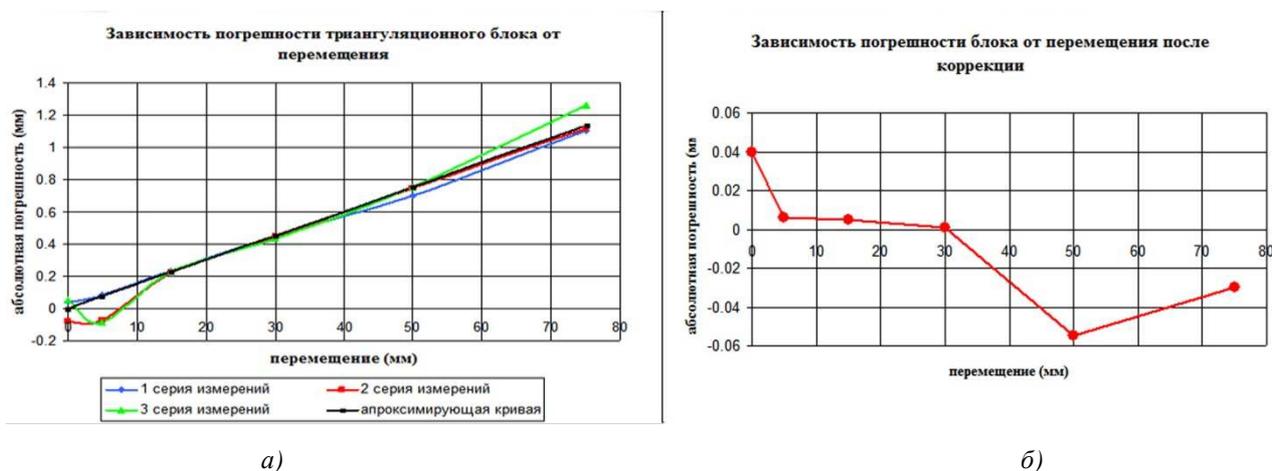


Рис. 4. Погрешности измерений

Погрешность измерений линейно возрастает с увеличением смещения струны, это позволяет провести аппроксимацию данных и получить теоретическую функциональную зависимость, которую можно использовать для коррекции систематических погрешностей (рис. 4 б). Т.о., остаются лишь случайные составляющие погрешности измерений, причины появления которых необходимо установить и, по возможности, устранить. После коррекции максимальное значение погрешности измерения составляет менее 0,06 мм, что соответствует относительной погрешности измерений в 0,1 %. Проанализировать причины случайных составляющих погрешности помогает вид светового пятна на ФП: оно несимметрично и имеет побочные максимумы, которые являются следствием спеклов, вызванных шероховатостью поверхности струны.

Заключение

Проведенные макетирование и исследования показали возможность создания автоматизированного устройства для контроля положения тела плотины, обладающего требуемой точностью измерений, хорошей воспроизводимостью результатов.

Было также установлено, что расфокусировка не повлияет на точность измерений, а, следовательно, ФП не обязательно устанавливать под углом Шейпфлюта. Это упростит будущую конструкцию устройства. Также для увеличения точности измерений предполагается заменить лазерный диод на светодиод с необходимой фокусирующей оптической системой. Данная замена исключит влияние спеклов и избавит от необходимости стабилизации энергетического центра лазерного пучка.

Список литературы

1. Байбаков А.Н., Ладыгин В.И., Пастушенко А.И. и др. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных // Автометрия. – 2004. – Т. 40. – № 2. – С. 58-64.
2. Венедиктов А.З. Методика проектирования триангуляционных измерительных систем для промышленного контроля и дефектации изношенных деталей: дисс. ... канд. техн. наук / Рязанский государственный радиотехнический ун-т; кафедра радиоуправления и связи ГОУВПО. – 2006. – С. 5-45.
3. Волков Е.В., Плотников С.В. Исследование влияния ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем // Автометрия. – 1997. – № 2. – С.19.
4. Колючкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 9. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/920.html>.
5. Михляев С.В. Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С.78.
6. Михляев С.В. Триангуляционное зондирование нестационарной поверхности // Автометрия. – 2001. – № 1. – С.67.
7. Плотников С. В. Сравнение методов обработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. – 1995. – № 6. – С.58.
8. Шрёдер Г., Трайбер Х. Мир физики и техники. Техническая оптика. – М.: Техносфера, 2006. – С.120-123.

Рецензенты:

Кузьмин В.Н., д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по оптике и фотометрии, ООО «Научно-техническое предприятие «ТКА», г. Санкт-Петербург;
Дич Л.З., д.т.н., гл. инженер ЗАО «Петер-Сервис», г. Санкт-Петербург.