

УДК 681.786.42

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Миннигазимов Р.И., Митрофанов С.С., Порохин В.В., Гнездилова М.С.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Санкт-Петербург, e-mail: rikos111@yandex.ru

В работе представлена методика упрощенного расчета энергии в триангуляционных измерительных устройствах. Расчет параметров проводится с учетом влияния формы и размеров объекта исследований на работоспособность разрабатываемого устройства. Одной из задач, решаемой триангуляционными устройствами, является постоянный контроль за техническим состоянием несущих конструкций гидротехнических сооружений. Измерение смещения вертикальной струны позволяет наблюдать за состоянием гидротехнических сооружений и контролировать смещение тела плотины. Триангуляционный метод измерения расстояния от измерителя до поверхности объекта (струны) предполагает, что в оптическую схему измерителя включен сам контролируемый объект. Его характеристики (форма, характер поверхности и расположение относительно измерителя) могут существенно влиять на результаты триангуляционных измерений. Была разработана функциональная схема контрольно-измерительного устройства, предложена методика расчета энергии исходя из специфики поставленной задачи.

Ключевые слова: триангуляция, измерительные системы, контроль положения, гидротехнические сооружения

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODOLOGY FOR TRIANGULATION MEASURING DEVICES

Minnigazimov R.I., Mitrofanov S.S., Porokhin V.V., Gnezdilova M.S.

Saint-Petersburg State Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, e-mail: rikos111@yandex.ru

The paper presents a methodology for simplified energy calculation in triangulation measuring devices. Parameters calculation taking into account the influence of the shape and size of the research object on the efficiency of the developed device. One of the tasks solved by triangulation devices is the constant monitoring of the load-bearing structures of hydroengineering structures technical condition. Displacement measurement of control points of vertical strings, allows to observe the state of hydroengineering structures and to monitor the displacement of the dam body. The triangulation method of measuring the distance from the measuring device (strings) to the surface of the object assumes that the monitored object itself is included in the optical scheme of the measuring device. Its characteristics (shape, surface character and location relative to the measure) can significantly influence on the results of triangulation measurements. A functional diagram of the control instrument was developed. A methodology for calculating energy based on the specific nature of the task was proposed.

Keywords: triangulation, measuring systems, position control, hydraulic engineering constructions

Лазерная триангуляция в последнее время находит все большее применение при создании прецизионных измерительных датчиков и систем для решения широкого класса задач размерного контроля в диапазоне от единиц миллиметров до метра с погрешностями от долей микрона до сотен микрон.

Одной из задач, решаемой триангуляционными датчиками, является контроль за состоянием несущих конструкций плотин гидротехнических сооружений. Так как плотины являются объектами повышенной опасности, им требуется постоянный контроль. Наблюдения за состоянием гидротехнических сооружений представляют из себя контроль смещений тела плотины, который осуществляется измерением смещения контрольных точек вертикальных отвесов. Данные отвесы закладываются в конструкцию плотины на этапе строительства.

Несмотря на большое многообразие автоматических систем для визуального кон-

троля, в настоящее время контрольно-измерительные задачи решаются при помощи визуальных измерителей, построенных по схеме Катырева – Брехмана [1]. Недостатками датчиков, построенных по схеме Катырева – Брехмана, являются большой вес и размер, а также ошибки снятия отсчетов оператором и, как следствие, невысокая точность. На некоторых гидротехнических сооружениях для решения задач контроля используются фотоэлектрические преобразователи перемещения. Устройства, основанные на них, являются более точными, однако их стоимость высока.

Исходя из всего вышесказанного, вытекает необходимость создания мобильной контрольно-измерительной системы, с высокой точностью работы, с малыми габаритами, с возможностью обеспечить измерения в двух плоскостях, а также устройство должно быть простым в эксплуатации и иметь функцию быстрой настройки. Подобное

устройство должно упростить контрольно-измерительные операции, проводимые на гидротехнических сооружениях, и повысить их точность [1].

Объект исследования

Объектом исследования является струна отвеса, несущих конструкций гидро-сооружений и устройство, основанное на триангуляционном методе. Триангуляция является одним из распространенных методов измерения расстояний до объекта в силу простоты реализации в оптико-электронных устройствах [1]. Триангуляционный метод измерения расстояния от контрольно-измерительной системы до поверхности объекта предполагает, что в оптическую схему датчика включен сам контролируемый объект – струна. Его характеристики (форма, характер поверхности и расположение относительно измерителя) могут существенно влиять на результаты триангуляционных измерений.

Принцип измерения заключается в том, что любое изменение положения струны вызывает соответствующее ему изменение положения светового пятна на фотоприёмнике. Зная параметры оптической системы, можно вывести формулу, связывающую изменение положения объекта с изменением положения светового пятна на фотоприёмнике. Это можно пояснить, используя рис. 1.

Лазерный луч осветителя 1 падает на поверхность струны 3. Отраженные от струны лучи, объективом 4 собираются на фотоприёмнике 5, который устанавливается под некоторым углом триангуляции α к осветителю так, чтобы осветитель, струна и блок фотоприёмника 2 образовали треугольник. В реальных триангуляционных системах эти лучи проецируются на многоэлементный фотоприёмник 5 [3]. В процессе смещения струны Δh происходит пропорциональное смещение её изображения P на фотоприёмнике, по которому судят о реальной величине смещении струны, а именно [5]

$$\Delta h = \left(\frac{f' \cdot P}{M \cdot P \cdot \cos(2\alpha) + f' \cdot M^2 \cdot \cos(2\alpha) \cdot \sqrt{\frac{M^2 + \tan^2(2\alpha)}{M^2}}} \right), \quad (1)$$

где M – увеличение оптической системы; f' – заднее фокусное расстояние системы.

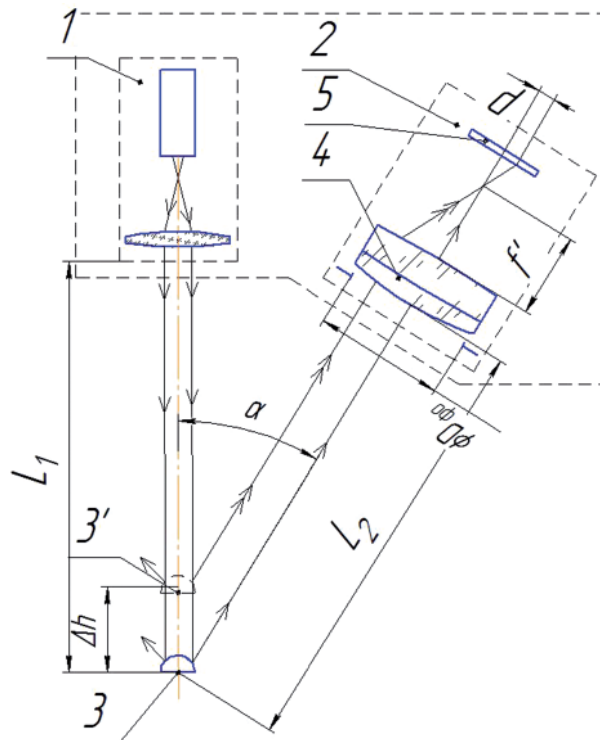


Рис. 1. Триангуляционный метод измерений:

L_1 – расстояние до нулевого положения струны; L_2 – расстояние от струны до главной плоскости объектива фотоприемного узла; f' – фокусное расстояние объектива; p – смещение светового пятна на ФП; Δh – смещение струны; α – угол триангуляции

Существуют два типа триангуляционных устройств: в первом случае плоскость устройства перпендикулярна его оптической оси, а во втором – наклонена к ней под определенным углом в соответствии с принципом Шеймпфлюга [4].

В зависимости от того, какими свойствами обладает поверхность струны, следует использовать разные схемы триангуляционного измерения [2]. При работе со струной можно использовать любую из схем, т.к. с одной стороны струна хорошо отражает падающее на нее излучение, а с другой – из-за круглой (в сечении) формы и наличия шероховатости рассеивает падающий пучок света.

Принципиальная схема предлагаемого триангуляционного датчика приведена на рис. 2. Она содержит следующие компоненты: осветитель 1, объектив 2, фотоприёмник (ФП) 3.

Для того чтобы проектируемое устройство удовлетворяло условиям поставленной задачи, необходимо задать начальные параметры, рассчитать осветитель, объектив и выбрать фотоприёмник, а затем оценить рассчитанные значения.

Работоспособность контрольно-измерительной системы, в основе которой лежит триангуляционный метод измерения расстояния до объекта, сильно зависит от формы и размеров струны. Поэтому большое внимание следует уделить выбору пары осветитель – фотоприёмник, так чтобы отношение сигнал/шум на фотоприёмнике, позволяло выделить полезный сигнал на фоне шумов. Также не стоит забывать, что помимо потерь, связанных с формой струны, остается еще ряд факторов, которые влияют на падающее излучение, к примеру потери на рассеивание и поглощение при прохождении воздушного тракта до струны и обратно.

Энергетический расчет в упрощенном виде можно провести исходя из допущений, что среда, в которой распространяется лазерное излучение, не вносит изменений ни в геометрию пучка, ни в его энергетику, а оптические компоненты свободны от aberrаций. При этом потери обусловлены лишь формой и размером струны. В процессе реализации поставленной задачи оценку сигнал/шум можно свести к отношению площадей пучка лазерного излучения при различных положениях струны.

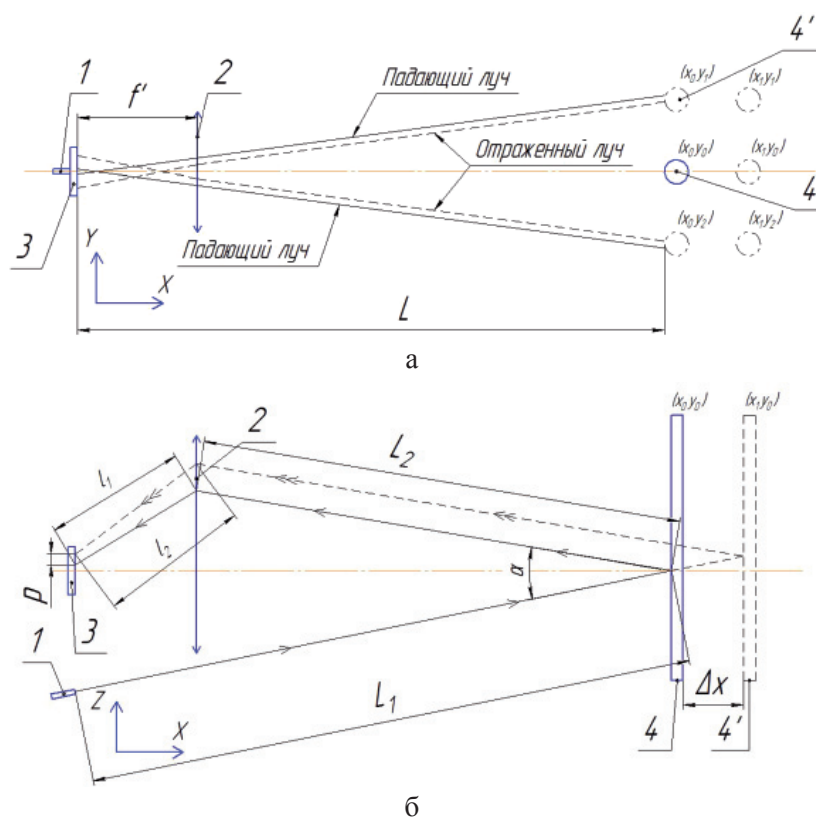


Рис. 2. Принципиальная схема триангуляционного контрольно-измерительного устройства:
 L_1 – расстояние до нулевого положения струны; L_2 – расстояние от струны до главной плоскости объектива фотоприемного узла; Δx – смещение струны; α – угол триангуляции;
 l_1 и l_2 – расстояние от главной плоскости объектива до фотоприемной площадки

Сечение пучка лучей, освещающего струну, представляет из себя эллипс, площадь S_1 которого определяется по следующей известной формуле:

$$S_1 = a_1 \cdot b_1 \cdot \pi, \quad (2)$$

где a_1 и b_1 – малая и большая полуоси эллипса, рассчитываемые по формулам

$$a_1 = d_0 + L_1 \cdot \tan(\varphi_1), \quad (3)$$

$$b_1 = d_0 + L_1 \cdot \tan(\varphi_2). \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) – d_0 – диаметр пучка излучения на выходе из осветителя; L_1 – расстояние от осветителя до струны; φ_1 и φ_2 – углы расходимости лазерного излучения.

Отраженное излучение от струны распространяется в широком телесном угле. В первом приближении можно положить, что отражение будет равномерным по всему диаметру струны. А при помощи коэффициента K можно рассчитать ту часть отраженного излучения, которая будет лежать в телесном угле, ограниченном входным зрачком объектива. Для расчета полного отражения от струны, которое определяется площадью S_2 (рис. 3), воспользуемся следующей формулой:

$$S_2 = K a_2 b_2 \pi, \quad (5)$$

где a_2 – диаметр струны; b_2 – размер светового пятна в продольном сечении струны, который высчитывается по следующей формуле:

$$b_2 = 2\sqrt{b_1^2 - \Delta y^2}, \quad (6)$$

где Δy – смещение струны относительно нулевой точки (рис. 3).

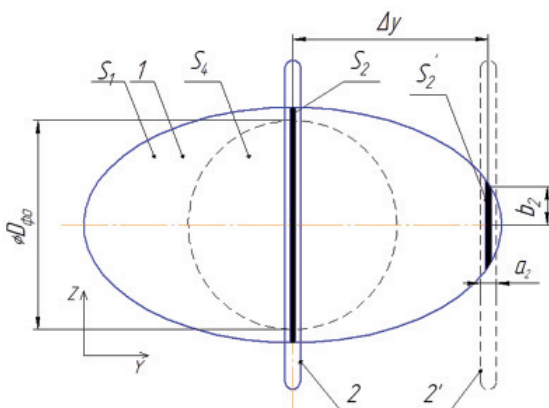


Рис. 3. Отношение площади сечения пучка излучения к площади струны:

- 1 – сечение пучка;
- 2 – струна в нулевом положении;
- 2' – струна в крайнем положении

Коэффициент K , учитывающий изменение площади S_2 на S_2' , находится по формуле

$$K = 2 \tan \left(\frac{D_{\text{фо}}}{2L_2 + a_2} \right), \quad (7)$$

которая легко выводится из анализа рис. 1.

Излучение осветителя, отраженное от струны, «срезается» еще раз на входе в блок фотоприёмника, дело в том, что входной диаметр объектива много меньше, чем сечение пучка излучения.

Излучение на входе в блок фотоприёмника будет определяться площадью S_3 (в сечении тоже эллипс), которую можно рассчитать по формуле

$$S_3 = a_3 b_3 \pi, \quad (8)$$

где a_3 и b_3 – малая и большая полуоси эллипса на входе в блок фотоприёмника, рассчитываемые по формулам

$$a_3 = 2(a_2 K + L_2 \tan(\varphi_1)); \quad (9)$$

$$b_3 = 2(b_2 + L_2 \tan(\varphi_2)). \quad (10)$$

Для определения полного коэффициента потерь K_n необходимо определить площадь входного зрачка S_4 объектива, роль которого выполняет первая оправа линзы. Нетрудно видеть, что она равна (рис. 3)

$$S_4 = \frac{D_{\text{фо}}^2 \pi}{4}, \quad (11)$$

тогда

$$K_n = \frac{S_2 S_4}{S_1 S_3}. \quad (12)$$

Очевидно, что мощность излучения P_k падающая на фотоприёмник, определяется как произведение мощности излучения осветителя P_n и коэффициента потерь K_n , т.е.

$$P_k = P_n K_n. \quad (13)$$

Для проведения предварительных расчетов была взята схема, изображенная на рис. 2. Также были заданы начальные данные, представленные в табл. 1.

Данная система предназначена для автоматической регистрации смещений несущих конструкций гидротехнических объектов. По предложенному алгоритму был произведен энергетический расчет результаты представлены в табл. 2.

По произведенному расчету была выбрана следующая пара осветитель – фотодиод.

В качестве осветителя был выбран двух координатный PSD приемник DL100-7 SMD компании First sensor. В качестве осветителя был выбран лазерный модуль KLM-H808-x-5. Отношение сигнал/шум у данной пары $2,3 \cdot 10^4$.

Таблица 1

Начальные данные для предварительного расчета триангуляционной измерительной системы

Мощность осветителя P_n , мВт	Рабочие расстояния, мм		Диапазон измерений z , мм	Диаметр струны a_2 , мм	Диаметр выходного зрачка d_0 , мм	Угол расходимости, град	
	L_1	L_2				α_1	α_2
4000	1000	950	-75...+75	2	5	9,6	9,6

Таблица 2

Результаты расчета триангуляционной измерительной системы

Мощность излучения на поверхности струны, мВт	Мощность излучения, отраженная от струны, мВт	Мощность излучения на фотоприемнике, мкВт
4000	5,234	59

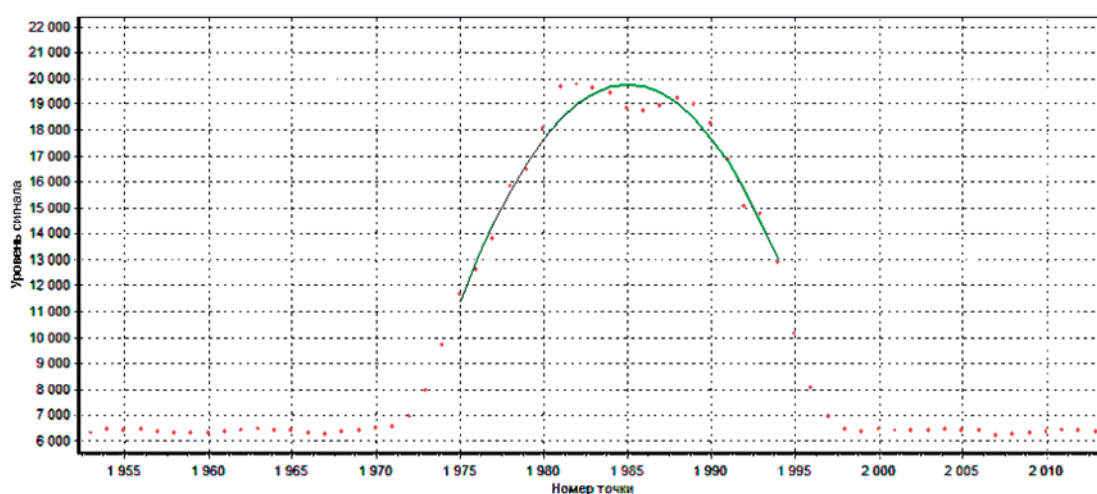


Рис. 4. Зависимость уровня сигнала на фотоприемнике от положения струны. Точками изображен график, построенный по полученным экспериментальным данным, сплошной линией – аппроксимация экспериментальных данных

Заключение

Апробация разработанной методики проводилась на установке, описанной в [1], в которой были установлены указанные фотоприемники и осветитель при заданных параметрах. При этом удавалось уверенно снимать и обрабатывать информацию с фотоприемника, даже не требовалось специально экранировать его, что является косвенным подтверждением того факта, что отношение сигнал/шум у этой пары существенно выше одного порядка. На рис. 4 приведен уровень сигнала, снимаемого с фотоприемника в зависимости от положения струны.

Более точные данные планируется получить на следующем этапе работы. Другим положительным моментом применения методики является возможность моделирования различных комбинаций

фотоприемник\источник излучения и выбора оптимальной комбинации.

Список литературы

1. Бурков А.С., Митрофанов С.С. Возможность создания автоматизированного устройства для контроля плановых смещений тела плотины // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1; URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18336> (дата обращения: 08.04.2017).
2. Вергопрахов В.В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений // Автометрия. – 1995. – № 6. – С. 64.
3. Ильченко В.Н. Оптимальный контроль геометрических параметров изделий сложной формы с помощью оптических измерительных систем // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 45–47.
4. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения: учебное пособие для вузов. – СПб.: Папирус, 2003. – 240 с.
5. Михляев С.В. Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 4. – С. 78.