

А. В. ШИЛОВ¹, канд. физ.-мат. наук

А. Б. СОТСКИЙ¹, д-р физ.-мат. наук, проф.

Е. А. ЧУДАКОВ¹, канд. физ.-мат. наук

Д. В. ПОНКРАТОВ¹

М. Э. ПОДЫМАКО²

¹Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова (Могилев, Беларусь)

²ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ БАЛОК

Аннотация. Предложен и апробирован экспериментально метод оптического контроля ориентации и размеров параллельных вертикальных балок, основанный на модели прямоугольного поперечного сечения балки. Метод предполагает использование лазерного уровня и оптического теодолита, имеет субмиллиметровую точность и прост в реализации.

Ключевые слова: дистанционный контроль конструкций, лазерный уровень, оптический теодолит, обратная оптическая задача.

Введение. Дистанционный оптический контроль конструкций, содержащих прямоугольные параллельные балки, востребован в шахтах и в

строительстве. Известные методы такого контроля предполагают использование лидарных систем [1], либо систем с лазерами непрерывного действия, калибруемых с использованием нейронных сетей [2, 3]. В этих методах имеются ограничивающие факторы включая высокую стоимость оборудования и ограниченную (миллиметровую) точность получаемых результатов. Актуальна разработка альтернативных подходов к проблеме. Метод такого рода представлен в настоящем докладе. Его реализация предполагает использование лазерного уровня и оптического теодолита.

Схема измерений. Ее иллюстрирует рис.1а. Балки освещаются двумя горизонтальными линиями лазерного уровня, разделенными промежутком d . Рассеянное излучение регистрируется теодолитом. Расстояние по вертикали от центра теодолита до рабочей плоскости лазерного уровня равно $|z_0|$. Фрагмент рабочей линии лазерного уровня на балке 3, наблюдаемый через окуляр теодолита, приведен на рис.1б.

Измеряемые угловые координаты видимых точек линий лазерного уровня на балках равны θ и φ . Тогда z – координата рабочей плоскости лазерного уровня

$$z_0 = \frac{d \tan(\theta - \delta\theta)}{|\tan(\theta - \delta\theta) - \tan(\theta)|}. \quad (1)$$

Координаты точек рабочей линии лазерного уровня на балках в системе координат теодолита определяются по формулам

$$x_i = -z_0 \tan(\theta_i) \cos(\varphi_i), \quad y_i = z_0 \tan(\theta_i) \sin(\varphi_i), \quad (2)$$

где $i = \overline{1, N}$ – номера точек. Контур сечения балок 3 и 4 плоскостью $z = z_0$ представлены на рис.2.

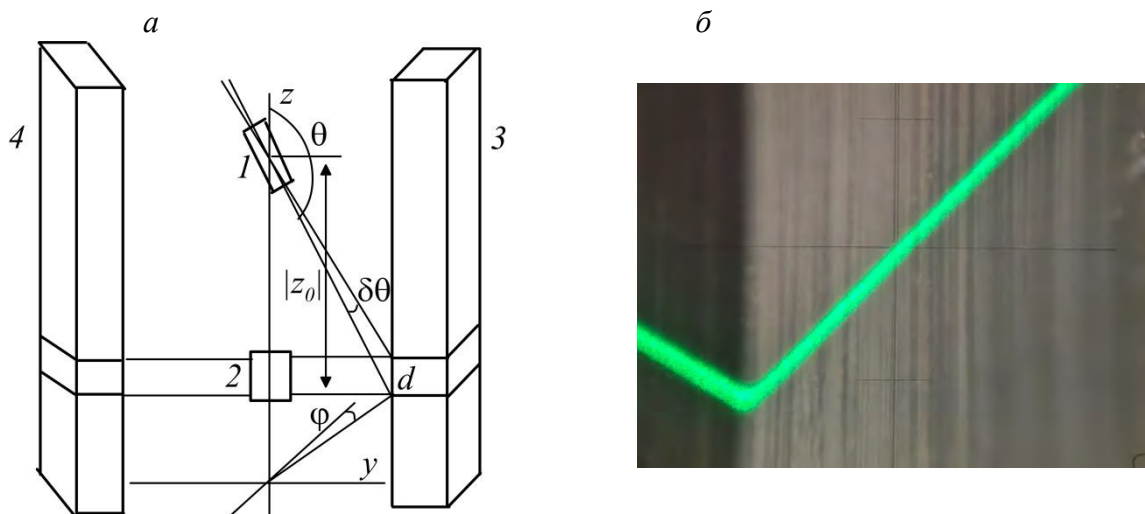


Рис. 1. Схема оптического контроля ориентации прямоугольных балок: 1 – теодолит, 2 – лазерный уровень, 3,4 – прямоугольные вертикальные балки (а) и фотография фрагмента рабочей линии лазерного уровня на балке 3 в поле зрения теодолита (б)

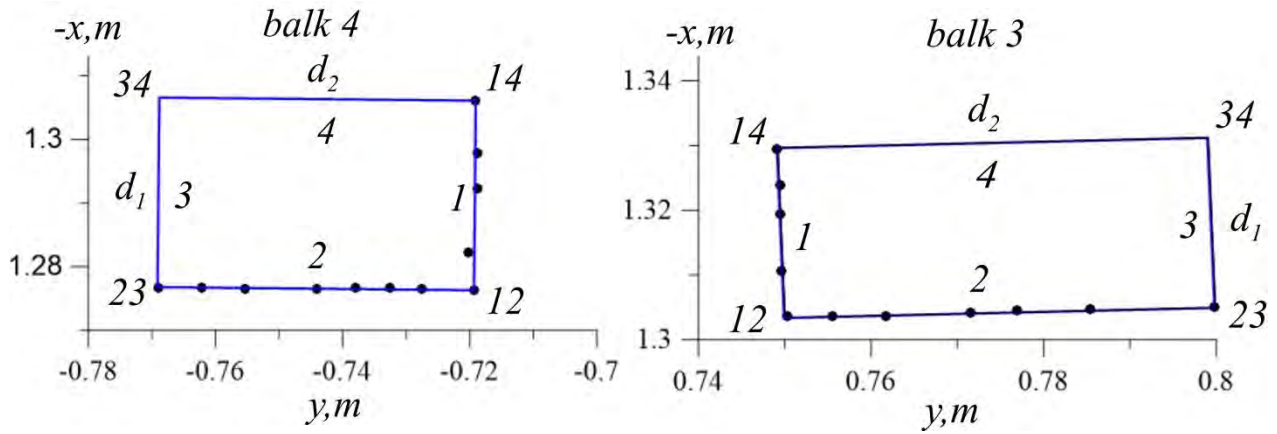


Рис. 2. Контуры сечения балок плоскостью лазерного уровня $z = z_0$. Дискретные точки – экспериментальные данные

Здесь лазерным уровнем освещены стороны сечений 1 и 2, а стороны 3 и 4 находятся в тени и поэтому в зрительную трубу теодолита не наблюдаются. Двухзначными номерами помечены ребра сечений. Эти номера соответствуют номерам пересекающихся линий (сторон сечений).

В согласии с прямоугольной моделью сечений балок точки, относящиеся к линиям 1 и 2 на рис.2 лежат на прямых, описываемых уравнениями

$$y = ax + b_1 \text{ (линия 1),} \quad (2)$$

$$y = -x / a + b_2 \text{ (линия 2),} \quad (3)$$

где a , b_1 , b_2 – константы, подлежащие определению методом наименьших квадратов. Целевой функцией является

$$F(a, N_1) = \sum_{i=1}^{N_1} [l_i^{(1)}]^2 + \sum_{i=N_1+1}^N [l_i^{(2)}]^2, \quad (4)$$

где

$$[l_i^{(1)}]^2 = (ax_i + b_1 - y_i)^2 / (a^2 + 1)$$

– квадрат расстояния i - й точки от линии 1,

$$[l_i^{(2)}]^2 = a^2(-x_i / a + b_2 - y_i)^2 / (a^2 + 1)$$

– квадрат расстояния i - й точки от линии 2,

$$b_1 = -(a \sum_{i=1}^{N_1} x_i - \sum_{i=1}^{N_1} y_i) / N_1, \quad (5)$$

$$b_2 = (a^{-1} \sum_{i=N_1+1}^N x_i + \sum_{i=N_1+1}^{N_1} y_i) / (N - N_1), \quad (6)$$

и предполагается, что точки с номерами $i = \overline{1, N_1}$ соответствуют линии 1, а точки с номерами $i = \overline{N_1 + 1, N}$ – линии 2.

В согласии с (2), (3), (5), (6), после отыскания минимума функции (4) пространственная ориентация рассматриваемой балки становится известной. В частности, для координат ребра 12 имеем

$$x_{12} = a(b_2 - b_1) / (a^2 + 1), \quad y_{12} = (b_1 + a^2 b_2) / (a^2 + 1).$$

Однако координаты ребер 23, 34, 14, а значит и длины сторон сечения балок d_1 , d_2 на рис.2 остаются неопределенными. Для их нахождения надо измерить углы θ_i , φ_i при номерах $i=1$ и $i=N$, соответствующих крайним точкам линий 1 и 2. После подстановки этих значений в (2) найдем x_{14} , y_{14} , x_{23} , y_{23} ,

$$d_1 = \sqrt{(x_{14} - x_{12})^2 + (y_{14} - y_{12})^2}, \quad d_2 = \sqrt{(x_{23} - x_{12})^2 + (y_{23} - y_{12})^2},$$

$$x_{34} = x_{14} - ad_2 / \sqrt{1+a^2}, \quad y_{34} = y_{14} + d_2 / \sqrt{1+a^2}.$$

Представленные соотношения дают полное решение обратной оптической задачи об определении ориентации и периметре прямоугольной балки в выбранной плоскости $z = z_0$.

Пример. Для тестирования подхода мы исследовали структуру, состоящую из двух стальных балок прямоугольного сечения, подобную представленной на рис. 1а. К этой же структуре непосредственно относятся рис.1б, 2. В экспериментах использован оптический теодолит 3Т5КМ с разрешающей способностью 5" и лазерный уровень INSPIRITECH G4F16. Значение z_0 , определенное по формуле (1), составляло $-0.776m$. В таблице 1 приведены результаты измерения углов θ_i и φ_i . Соответствующие табличным углам декартовы координаты точек на сторонах 1 и 2 балок отмечены на рис.2 дискретными точками. Сплошные прямые на рис.2 – результат решения обратных оптических задач по определению координат угловых точек сечения балок x_{12} , y_{12} , x_{23} , y_{23} , x_{14} , y_{14} , x_{34} , y_{34} . Эти результаты относятся к значению $N_1 = 4$, найденному методом наименьших квадратов для обеих балок.

Таблица 1. Измеренные значения углов θ_i и φ_i

balk 3			balk 4		
i	θ_i , deg	φ_i , deg	i	θ_i , deg	φ_i , deg
1	116.97	29.40	1	117.51	-28.84
2	117.04	29.52	2	117.63	-28.97
3	117.10	29.60	3	117.70	-29.08
4	117.22	29.77	4	117.83	-29.32
5	117.30	29.92	5	117.92	-29.40
6	117.26	30.10	6	117.85	-29.68
7	117.21	30.30	7	117.81	-29.85
8	117.13	30.61	8	117.77	-30.03
9	117.08	30.78	9	117.72	-30.23
10	117.01	31.05	10	117.63	-30.61
11	115.90	31.51	11	117.57	-30.83
=	=	=	12	117.52	-31.06

В табл. 2 сопоставлены результаты прямого измерения длин сторон балок d_1 , d_2 штангенциркулем (строка мес) и восстановления d_1 , d_2 по описанному алгоритму (строка opt)

Таблица 2. Восстановление длин сторон сечения балок

	balk 3		balk 4	
метод	d_1 , mm	d_2 , mm	d_1 , mm	d_2 , mm
mec	26,3	49,9	29,9	49,8
opt	25,9	49,9	29,9	49,5

Видимое из табл.2 расхождение результатов разных методов находится в пределах 0.4mm. Это расхождение можно отнести в счет как погрешности принятой прямоугольной модели сечения балок, так и конечной толщины линии лазерного уровня. Отметим также, что расстояние между центрами балок 3 и 4 (под координатами центров балок понимаются $\bar{x} = 0.25(x_{12} + x_{14} + x_{23} + x_{34})$, $\bar{y} = 0.25(y_{12} + y_{14} + y_{23} + y_{34})$), измеренное рулеткой и рассчитанное через найденные координаты угловых точек сечений балок равны соответственно 1,469 m и 1,4595 m, их расхождение находится в пределах погрешности рулетки.

Заключение. Оценки показали, что при использовании лазерного уровня с толщиной линии менее 1 mm и теодолита с угловым разрешением секундного порядка предложенный метод позволяет определить координаты угловых точек сечения прямоугольных балок с погрешностью, не превосходящей 0.1 mm. Но ценой столь высокой точности являются заметные временные затраты и жесткие требования к стабильности элементов установки. Ускорение измерений возможно за счет перехода к обработке фотографических изображений линий лазерного уровня на балках. Корректность получаемых при этом результатов может контролироваться с помощью разработанного метода, который принципиально более точен.

Работа выполнена в рамках ГПНИ РБ «5.1. Фотоника и лазерно-оптические технологии».

Список литературы

1. Zhu, X. Development of multi-sensors fusion monitoring system for shaft wall deformation / X. Zhu [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35, No. 8. – P. 086203-1–086203-16. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad4622
2. Давыденко, Е.В. Калибровка положения видеокамеры в задаче оптической лазерной триангуляции / Е.В. Давыденко, А.Л. Приоров // Цифровая обработка сигналов. – 2009. - №3. С. 16 – 20.
3. Li, B. Research on a Lightweight Vision-based Monitoring Method for Rigid Guide Rail Joint Defects in Coal Mine Shafts / B. Li // International Journal of Advanced Engineering and Technology Research. – 2026. – Vol. 2, № 1. – P. 50–55.

Контакты:

undersv@yandex.ru (Шилов Артур Владимирович)
d.v.ponkratov@yandex.by (Понкратов Дмитрий Васильевич);
ab_sotsky@mail.ru (Сотский Александр Борисович);
kenni_mark@bk.ru (Чудаков Евгений Александрович);
podymako_m@mail.ru (Подымако Максим Эдуардович)