



# Оценка точности определения расстояний по расходимости лазерного луча в системах геодезического мониторинга

А.В. Мареев<sup>1</sup>✉, В.Р. Янгальшев<sup>1</sup>, А.В. Макеев<sup>1</sup>, Л.А. Каргина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Новосибирск, Россия

✉ a.v.mareev@sgugit.ru

## цитирование

Мареев А.В., Янгальшев В.Р., Макеев А.В., Каргина Л.А. Оценка точности определения расстояний по расходимости лазерного луча в системах геодезического мониторинга // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 2. С. 20–33. DOI:10.30533/GiA-2026-013.

## ключевые слова

компьютерное зрение, геодезический мониторинг, створные системы наблюдений, мониторинг лазерного пятна, открытый код, расходимость лазерного пучка

## аннотация

Представлена оценка применимости алгоритмов и программ технического зрения в системах наблюдений геодезического мониторинга. Рассмотрена методика определения линейных смещений по эффекту расходимости лазерного луча при формировании измерительного узла автоматизированной системы наблюдений. Измерительный узел включает полупроводниковый лазер, микроконтроллерный модуль ESP32-CAM с цифровой видеокамерой OV2640 и матовый экран. Экспериментально подтверждена возможность определения изменений расстояния между источником лазерного излучения и экраном с ошибкой 2 мм в диапазоне от 30 до 50 м. Обработка видеоизображений осуществляется с использованием открытого программного обеспечения, реализующего алгоритмы обнаружения и анализа положения лазерного пятна на матрице камеры. Представлены экспериментальные данные, полученные в контролируемых условиях, предназначенные для верификации и усовершенствования алгоритмов технического зрения. Разработанное решение обеспечивает непрерывный режим регистрации смещений и может применяться в составе системы мониторинга деформаций инженерных сооружений. Использование малобюджетных компонентов и открытого программного обеспечения делает систему доступной для широкого внедрения. Результаты исследования направлены на повышение точности и автономности систем геодезического мониторинга. Предложенная архитектура измерительного узла позволяет исключить применение импульсного дальномера при определении полного вектора смещений,

что снижает стоимость и энергопотребление системы. Методика может быть востребована в условиях удаленных территорий, где затруднен регулярный доступ к объектам наблюдения.

## 1 Введение

Для зданий и сооружений, эксплуатируемых длительное время, потребность в системах для геодезического мониторинга в режиме реального времени постоянно повышается по мере роста геотехнических и геодинамических рисков, которые увеличиваются вследствие накопления физического износа в эксплуатируемых жилых и промышленных зданиях. Дополнительным фактором риска для сооружений в регионах Крайнего Севера является также таяние многолетнемерзлых грунтов [1].

Одним из основных препятствий развития автоматизированных систем наблюдения для геодезического мониторинга является высокая стоимость технических средств измерений. В настоящее время профессиональное сообщество прикладывает значительные усилия к повышению доступности подобных систем. Для решения ряда задач геодезического мониторинга уже достаточно эффективно применяются: малобюджетное оборудование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2], фотограмметрические системы мониторинга с использованием постоянно закрепленных фотокамер [3], системы наблюдений, основанные на задании направления с помощью опорного лазерного луча и регистрации изображения в контролируемой точке с использованием алгоритмов технического зрения [4–7]. Несмотря на принимаемые меры, одним из основных и стабильных способов для выполнения геодезического мониторинга остается высокоточное геометрическое нивелирование. Отметим при этом, что основные недостатки способа — низкая оперативность получения измерительной информации в силу того, что данная операция часто выполняется вручную, а также высокая стоимость работ на объектах, удаленных от развитых агломераций, включая территории Крайнего Севера.

Наиболее востребованным автоматизированным средством для систем геодезического мониторинга является роботизированный тахеометр. Он обеспечивает баланс между точностью и оперативностью измерений, а также информативностью за счет возможности отслеживания множества контрольных точек в поле зрения прибора. Наличие метрической камеры позволяет реализовывать сложные системы наблюдений с использованием алгоритмов компьютерного зрения и расширять за счет этого функциональные возможности прибора [8, 9]. Однако действующие системы мониторинга на базе роботизированного тахеометра отличаются высокой стоимостью и ограничены по диапазону рабочих температур.

Альтернативой роботизированному тахеометру может служить система для наблюдений, использующая в качестве опорного направления лазерный луч в колокации с высокоточным цифровым инклинометром. Примером подобного устройства является прибор LaserTilt90<sup>1</sup>, в котором объединены импульсный дальномер и цифровой МЭМС-инклинометр (МЭМС — микроэлектромеханические системы). Прибор позволяет определять длину горизонтального проложения линии с погрешностью до 4 мм на расстоянии до 50 м в лабораторных условиях. При помощи аналогичных по конструкции приборов можно определять вертикальные смещения с миллиметровой погрешностью [10]. Основным недостатком систем наблюдений в данных приборах заключается в невозможности определения полного вектора смещений контролируемой точки, в отличие от известных решений на основе роботизированного тахеометра или ГНСС-приемника.

---

1 LoadSensing Wireless Laser Tiltmeter // Specto Technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.spectotechnology.com/product/loadsensing-wireless-laser-tiltmeter/> (дата обращения: 01.10.2025).

Определение полного вектора смещения на контролируемой точке с использованием лазерного луча в качестве опорного направления (в горизонтальном направлении — поперек опорного направления и вдоль него) возможно с помощью системы наблюдения на основе компьютерного зрения. Измерительный узел такой системы включает два устройства: задающее, устанавливаемое на опорной точке, и регистрирующее, располагаемое на реперной (контролируемой) точке. Задающее устройство содержит источник коллимированного лазерного излучения и цифровой высокоточный инклинометр. Регистрирующее устройство на реперной точке состоит из матового экрана и модуля с цифровой видеокамерой, закрепленной над экраном. Камера калибруется и устанавливается вблизи от экрана на расстоянии не более 10 см [11]. Такая система регистрации обеспечивает отслеживание перемещения лазерного пятна поперек заданного опорного направления с точностью в несколько миллиметров на базах до 100 м. При помощи камер и трекинга пятна на наклонном экране можно также определять колебания конструкций, имеющих частоту до 3,5 Гц с погрешностью до 7 % [12]. Для определения полного вектора смещения систему необходимо дополнить лишь средством измерения расстояний. Наиболее простым решением видится интеграция импульсного дальномера, позволяющего измерять расстояния с ошибкой порядка 1 мм. Однако совмещение подобных устройств в единый узел на практике труднодостижимо, поскольку для осуществления высокоточного трекинга лазерного луча по экрану необходимы технические средства, с одной стороны, усиливающие контрастность лазерного пятна, с другой — снижающие влияние внешних условий, в особенности внешнего освещения. В разрабатываемой конструкции применяются экраны с низким коэффициентом отражения, а также светофильтры, устанавливаемые на входные окна перед экраном и на камеру, что препятствует работе импульсного дальномера и ограничивает его рабочий диапазон.

Одним из вариантов реализации автоматизированных систем геодезического мониторинга с использованием лазерного луча в качестве опорного направления является модернизация системы наблюдений компьютерного зрения с помощью программ определения расстояний по расходимости лазерного луча [13, 14]. Гипотеза исследования в этом случае состоит в том, чтобы путем отслеживания формы и перемещения лазерного пятна с применением технических средств компьютерного зрения устанавливать изменения расстояний с достаточной точностью для определения полного вектора смещений на контролируемой точке. В этом случае отпадает необходимость в применении импульсного дальномера.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Методика исследования

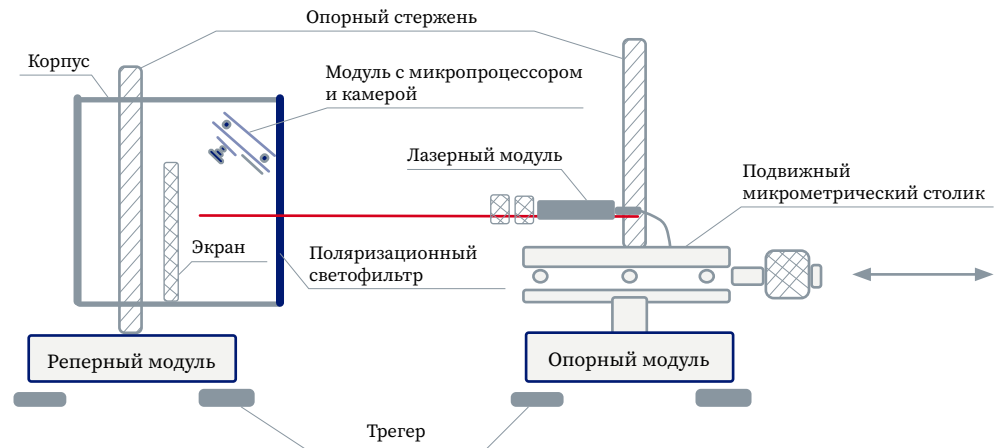
Методика исследования основана на оценке точности результатов измерения расстояний на базе прототипа измерительного модуля (задающее и регистрирующее устройства) для систем геодезического мониторинга с использованием лазерного луча в качестве опорного направления и устройства, предназначенного для определения изменений расстояния с использованием средств технического зрения. Задающее устройство содержит полупроводниковый источник лазерного излучения с коллиматором и устанавливается на опорной точке, а регистрирующее устройство включает экран с модулем цифровой видеокамеры и размещается на контролируемой точке (рис. 1). Камера фиксируется на расстоянии не более 10 см от экрана и оснащается дополнительными элементами с целью повышения качества отслеживания положения лазерного пятна, включая светофильтры. Для контроля результатов изменений расстояния

**Рис. 1** ➤

Условная схема расположения основных элементов экспериментальной установки

**Fig. 1**

Schematic diagram of the arrangement of the main elements of the experimental setup



применяется подвижный столик с микрометрическим винтом с чувствительностью к смещениям в продольном направлении плоскости 0,01 мм.

Исходными данными для проведения исследования являются видеозаписи смещений лазерного пучка, регистрируемые на реперном модуле. Оценка точности выполняется по временным рядам значений смещений, определенных по изменению формы и положения лазерного пятна с помощью алгоритмов технического зрения, а также по временным рядам эталонных смещений, задаваемых посредством подвижного столика с микрометрическим винтом.

Основными показателями для оценки точности результатов исследований являются средняя ошибка и среднеквадратическая ошибка (СКО) величины смещений:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^k |\Delta L_i - \Delta \hat{L}_i|}{k},$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\Delta L_i - \Delta \hat{L}_i)^2},$$

где  $k$  — количество моментов наблюдений во временном ряду;

$\Delta L_i$  — эталонное смещение на момент наблюдения  $i$ ;

$\Delta \hat{L}_i$  — оценка величины смещения, полученная с помощью алгоритмов технического зрения.

Оценка величины  $\Delta \hat{L}_i$  выполняется по регрессионной модели:

$$\alpha \bar{X}_i + \beta \bar{Y}_i + \gamma \Delta L_i^S = \Delta \hat{L}_i,$$

$$\text{где } \bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m},$$

$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m y_j}{m}$  — координаты центра масс контура лазерного пятна на экране, при этом  $m$  — количество точек контура,  $x_j$ ,  $y_j$  — координаты контура лазерного пятна, калиброванные за влияние дисторсии камеры;

$\Delta L_i^S$  — составляющая изменения величины смещения, связанная с изменением площади проекции лазерного пучка на экран;

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — калибровочные коэффициенты, определяемые методом множественной линейной регрессии (МЛР).

Величина  $\Delta L_i^S$  оценивается по изменению площади коллимированного лазерного пучка на экране. Расстояние между источником излучения и экраном  $L$ , диаметр пучка  $D$  и угол расходимости  $\theta$  связаны следующим соотношением<sup>2</sup>:

$$L = \frac{(D - D_c)}{2\theta},$$

где  $D_c$  — диаметр области когерентности лазерного пучка.

2 Губарев Ф.А. Измерение параметров лазерного излучения: методические указания. Томск: ТПУ, 2017. 7 с.

Разложение в ряд Тейлора (6) с эквивалентной заменой диаметра пучка на его площадь позволяет получить формулу для расчета изменения расстояния  $\Delta L_i^S$  от изменения площади лазерного пятна на экране

$$\begin{aligned} 7 \quad \Delta S_i &= S_i - S_0, \\ 8 \quad \Delta L_i^S &= \frac{\Delta S_i}{2\theta_0} \sqrt{\frac{\pi}{S_0}}, \\ 9 \quad \theta_0 &= \frac{\sqrt{\frac{S_0}{\pi}} - D_c}{L_0}, \end{aligned}$$

где  $S_0$  — начальное значение площади пятна;

$L_0$  — начальное расстояние между источником и экраном.

Для приближительных расчетов можно использовать в качестве  $D_c$  величину диаметра выходного отверстия коллиматора.

В идеальном измерительном узле форма лазерного пучка должна соответствовать кривой второго порядка. Однако на практике контур пучка искажается вследствие дефектов оптической системы, поэтому использование уравнения кривой второго порядка в качестве опорной модели приведет к неустойчивости решения при наличии выбросов.

Коэффициенты модели  $\alpha, \beta$  в выражении (3) стремятся к нулю при строго перпендикулярном направлении лазерного луча к плоскости экрана. Достижение такого положения на практике затруднено, при этом обнуление коэффициентов потенциально позволяет исключить калибровку системы при ее инициализации, что упрощает технологию слежения. Однако реализация данного условия требует высокоточной механической подстройки положения экрана, что увеличивает себестоимость измерительного устройства.

Площадь лазерного пятна вычислялась двумя способами. Первый способ основан на формуле Гаусса для расчета площади многоугольника:

$$10 \quad S_i^G = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^{m-1} x_j y_{j+1} + x_m y_1 - \sum_{j=1}^{m-1} x_{j+1} y_j - x_1 y_{m-1} \right|.$$

Второй способ предполагает численное интегрирование под кривой, полученной методом сплайн-интерполяции. В качестве аппроксимирующей функции использовался полином фиксированной степени  $n$ :

$$11 \quad S_i^S = \sum_{s=1}^l F(P_n(x((s-1)\frac{360}{l}))) - F(P_n(x(s\frac{360}{l}))),$$

где  $l$  — количество фрагментов сплайна;

$\frac{x_i}{(s-1)\frac{360}{l}/s\frac{360}{l}}$  — угловые границы фрагмента сплайна, определяемые направлением вектора текущей точки  $r_j(x_j, y_j)$  к оси  $OX$ ;

$s$  — индекс текущего фрагмента сплайна;

$P_n(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n$  — полином степени  $n$ .

Количество фрагментов сплайна  $k$  и степень полинома  $n$  оценивались эмпирически.

Коэффициенты полинома вычислялись методом множественной линейной регрессии для каждого момента наблюдения  $i$ :

$$12 \quad [c_0, c_1, c_2, \dots, c_n]_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{y}_i,$$

$$13 \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_j & x_j^2 & \dots & x_j^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & x_m^2 & \dots & x_m^n \end{bmatrix},$$

$$14 \quad \mathbf{y}_i = [y_0, y_1, \dots, y_m]_i.$$

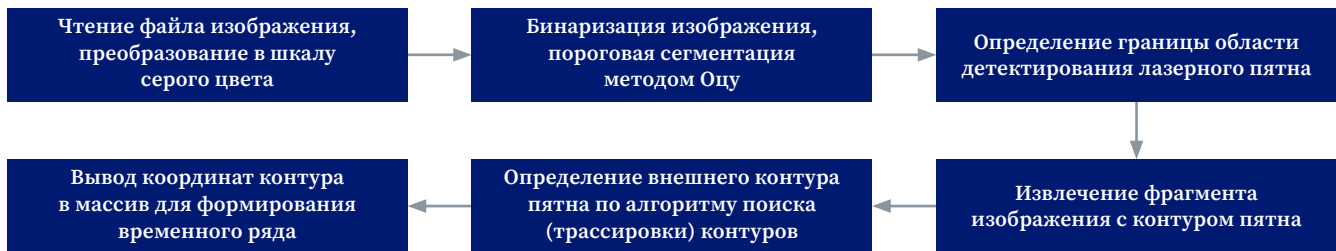
Координаты контура лазерного пучка определялись с использованием стандартных функций библиотеки OpenCV. Алгоритм выделения контуров представлен на UML-диаграмме (англ. Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования) (рис. 2).

**Рис. 2** 

UML-диаграмма алгоритма определения координат контура лазерного пучка на экране регистрирующего устройства

**Fig. 2**

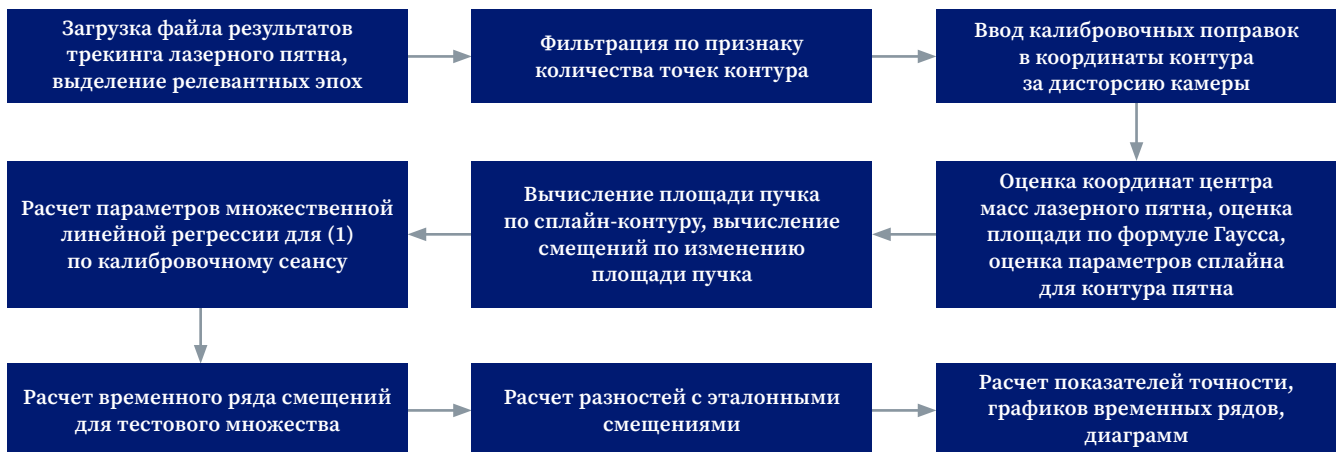
UML diagram of the algorithm for determining the coordinates of the laser beam contour on the reference module's screen

**Рис. 3** 

UML-диаграмма действий при обработке результатов эксперимента

**Fig. 3**

UML activity diagram for processing experimental results



Порядок проведения расчетов в процессе экспериментального исследования представлен на рис. 3. Исходные данные, включая видеозаписи, а также файлы распознавания движений доступны на платформе Open Science Framework<sup>3</sup>. Все расчетные процедуры реализованы в виде файлов типа Jupyter Notebook и размещены в веб-сервисе GitHub<sup>4</sup>.

## 2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 4) включает следующие элементы:

- элевационные штативы RGK SH-170, один из которых предназначен для закрепления полупроводникового лазера, а второй — для установки модуля с экраном и камерой;
- полупроводниковый лазерный модуль (длина волны 650 нм, мощность 50 мВт, габариты 16 × 68 мм) с возможностью фокусировки;
- подвижной столик с микрометрическим винтом (цена деления 0,01 мм, диапазон для фиксирования заданных смещений от 0 до 20 мм);
- матовый пластиковый экран, закрепленный на втором штативе;

<sup>3</sup> Files // Open Science Framework. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://osf.io/xcwud/files/osfstorage> (дата обращения: 28.09.2025).

<sup>4</sup> Программный код // GitHub Gist. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gist.github.com/ArtemMareev/1b2d9cc2b3631638e1cc19867b5cce72> (дата обращения: 28.09.2025).

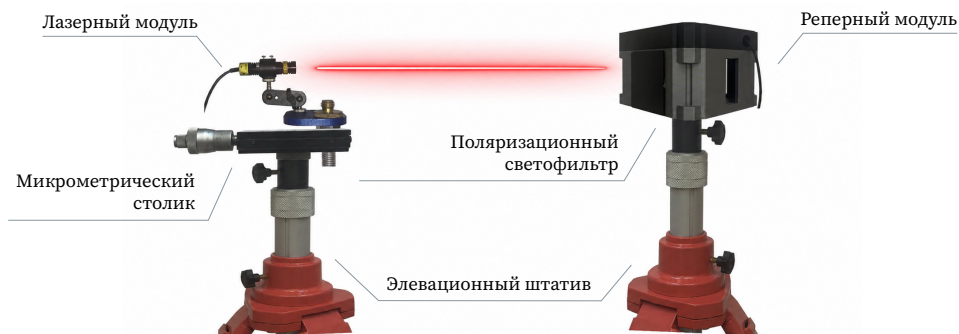
- цифровая видеокамера, установленная на расстоянии 7 см от экрана и выполненная в виде модуля ESP32-CAM с камерой OV2640 разрешением  $1600 \times 1200$  точек (2 Мп);
- поляризационный светофильтр, размещенный на входном окне реперного модуля;
- цифровой тахеометр EFT M1 (угловая точность 2", ошибка дальномера 3 мм в безотражательном режиме);
- лазерный импульсный дальномер Bosch PLR 50 C с паспортной ошибкой 2 мм и предельной дальностью 50 м, используемый в качестве референтного малобюджетного дальномера.

**Рис. 4** ➔

Экспериментальная установка

**Fig. 4**

The experimental setup



## 2.3 Эксперимент

Эксперимент включал три серии измерений, в каждой из которых проводились два сеанса — калибровочный и тестовый. В каждой серии устанавливалось фиксированное расстояние между опорной и контролируемой точками: 15, 30 и 50 м. За сеанс выполнялось 20 эталонных смещений в горизонтальной плоскости по направлению к экрану с шагом 1 мм с использованием столика с микрометрическим винтом.

Перед началом каждого сеанса измерялось начальное расстояние между экраном и лазерным модулем с помощью цифрового тахеометра. Каждое эталонное смещение фиксировалось вручную в цифровом журнале с применением программы «ВИМ-менеджер» [15]. Частота записи видеоданных модулем ESP32-CAM составляла 1 Гц. На одно смещение приходилось около 20 наблюдений. Общее количество моментов наблюдений в каждой сессии составляло порядка 400.

## 3 Результаты и обсуждение

В результате эксперимента установлено, что точность определения изменений расстояния с помощью технического зрения при использовании измерительного узла, включающего полупроводниковый лазер и модуль ESP32-CAM с цифровой камерой, составляет 2 мм в диапазоне от 30 до 50 м (табл. 1, 2, рис. 5). Для сравнения: лазерный импульсный дальномер Bosch PLR-50 C обеспечивает ошибку измерения расстояния 2 мм на дистанции до 50 м, однако только при использовании специальных светоотражающих мишеней.

На дистанциях до 15–20 м применение этого метода оказалось нецелесообразно вследствие снижения точности определения смещений до 5 мм (рис. 6). Указанный результат обусловлен длиной участка когерентности излучения используемого лазерного модуля, который составляет порядка 20 м. В пределах этой зоны расходимость лазерного пучка недостаточна для достоверного детектирования изменения площади пятна на экране с применением используемой системы регистрации. В связи с этим для диапазона до 20 м в качестве источника излучения рекомендуется использовать импульсный дальномер.

Таблица 1 ➤

Результаты оценки точности определения расстояний при помощи алгоритмов компьютерного зрения с использованием лазерного луча в качестве опорного направления (тестовые сеансы)

Table 1

Results of accuracy evaluation for distance estimation using computer vision algorithms with a laser beam as a reference direction (test sessions)

| Способ определения расстояний | Расстояние между модулями |         |                    |         |                    |         |
|-------------------------------|---------------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
|                               | 50 м                      |         | 30 м               |         | 15 м               |         |
|                               | Средняя ошибка, мм        | СКО, мм | Средняя ошибка, мм | СКО, мм | Средняя ошибка, мм | СКО, мм |
| МЛР (Гаусс)                   | 0,1                       | 2,3     | 2,1                | 2,1     | 3,9                | 3,1     |
| МЛР (сплайн)                  | 0,8                       | 2,6     | 1,7                | 2,1     | 3,8                | 3,1     |
| Площадь по Гауссу             | 4,3                       | 2,1     | 16,2               | 8,3     | 9,2                | 5,8     |

Таблица 2 ➤

Результаты оценки точности калибровки системы слежения за изменением расстояния при помощи алгоритмов компьютерного зрения с использованием лазерного луча в качестве опорного направления

Table 2

Results of calibration accuracy evaluation for a distance-change tracking system using computer vision algorithms with a laser beam as a reference direction

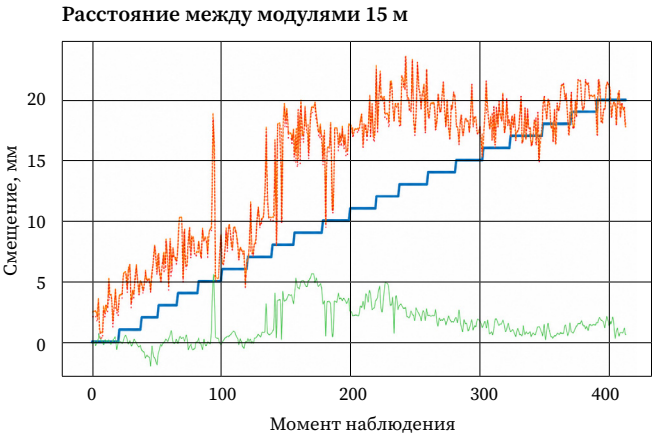
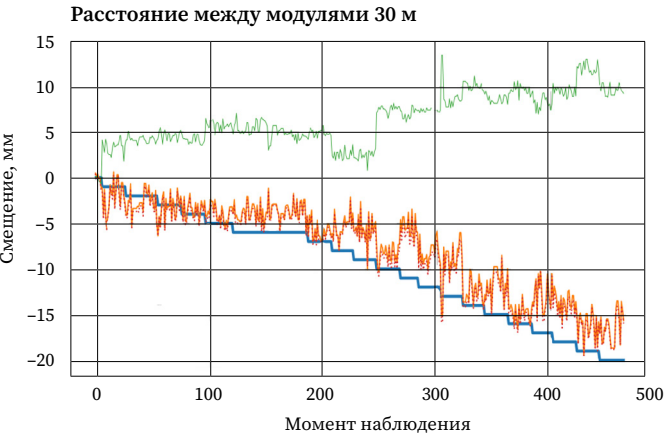
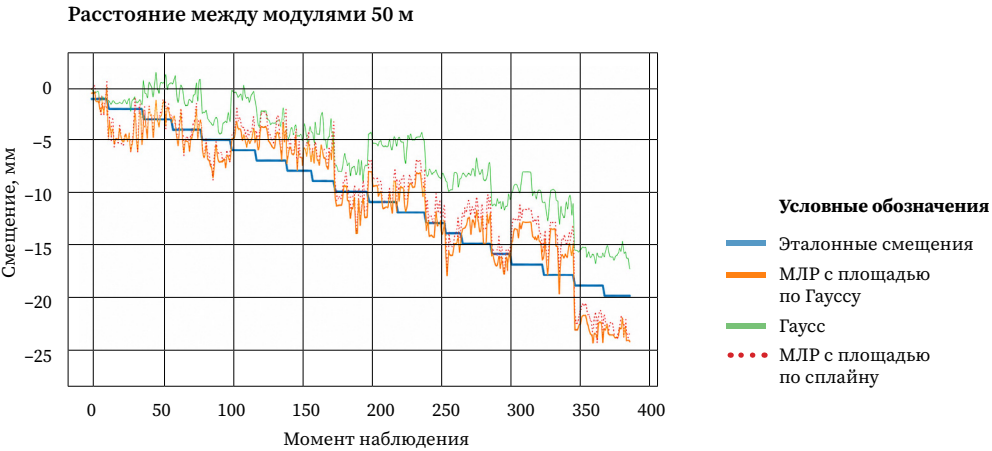
| Способ определения расстояний | Расстояние между модулями |         |                    |         |                    |         |
|-------------------------------|---------------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|
|                               | 50 м                      |         | 30 м               |         | 15 м               |         |
|                               | Средняя ошибка, мм        | СКО, мм | Средняя ошибка, мм | СКО, мм | Средняя ошибка, мм | СКО, мм |
| МЛР (Гаусс)                   | 0,0                       | 2,3     | 0,0                | 1,9     | 0,0                | 2,4     |
| МЛР (сплайн)                  | 0,0                       | 2,4     | 0,0                | 1,8     | 0,0                | 2,4     |
| Площадь по Гауссу             | 1,9                       | 3,0     | 15,0               | 9,3     | 11,0               | 4,5     |

Рис. 5 ➤

Графики временных рядов отслеживания изменения расстояния с помощью алгоритмов компьютерного зрения с использованием лазерного луча в качестве опорного направления при расстоянии между модулями 50, 30 и 15 м

Fig. 5

Time series plots of distance change tracking using computer vision algorithms on a reference laser beam at module separation distances 50, 30, 15 m

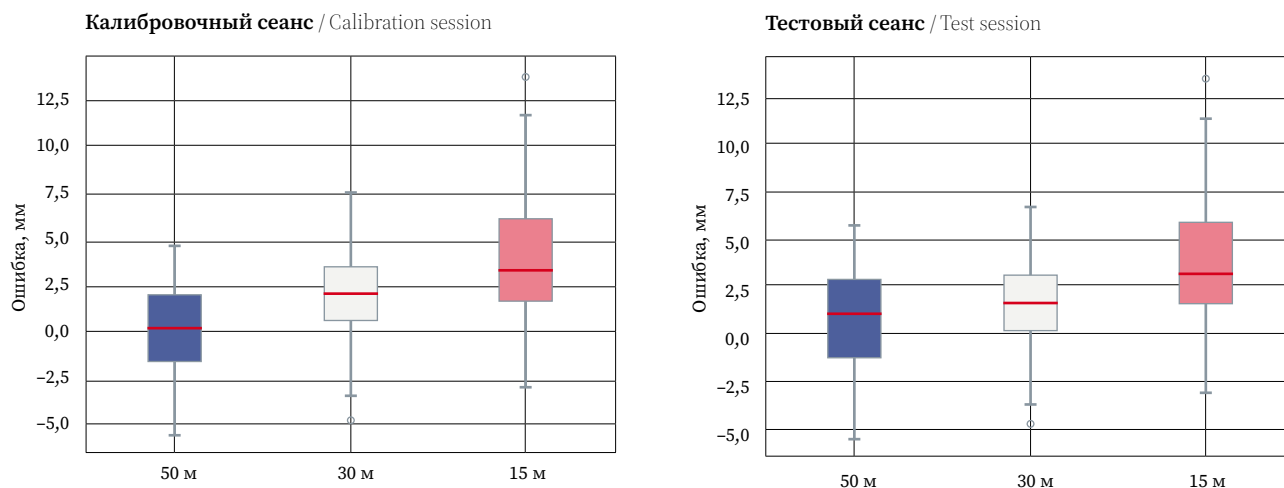


**Рис. 6** 

Блочная диаграмма ошибок определения изменения расстояний при помощи технологии компьютерного зрения с использованием лазерного луча в качестве опорного направления

**Fig. 6**

Block diagram of distance change estimation errors using computer vision technology on a reference laser beam



Использование промышленного импульсного дальномера в качестве источника излучения в измерительном узле возможно только на дистанциях до 15 м. На больших расстояниях дальномер не формирует устойчивого сигнала, либо требуется внесение конструктивных изменений в узел для обеспечения его работоспособности.

Исследования показали, что наивысшая точность измерения расстояний по площади лазерного пятна достигается при использовании сплайн-интерполяции с числом сегментов 2 и степенью полинома 3. Применение робастных алгоритмов оценки параметров полиномов из библиотеки `scikit-learn` не привело к повышению точности по сравнению с линейной регрессией.

Анализ временных рядов разностей между эталонными и оцененными смещениями выявил наличие остаточных систематических составляющих ошибки. Это указывает на недостаточную полноту учета влияющих факторов. Потенциально точность возможно повысить за счет применения сглаживающих функций, устойчивых к выбросам и оптимизации модели интерполяции.

Дальнейшее увеличение предельной дистанции при измерении расстояний по расходимости лазерного пучка возможно при модификации регистрирующего модуля. Дистанция 50 м является практически предельной для используемого оборудования: на этом расстоянии лазерное пятно остается в пределах экрана и обеспечивается достаточный запас для измерения смещений пятна в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

## 4 Выводы

Экспериментально установлено, что точность определения расстояния по изменению формы и положения лазерного пятна с использованием средств технического зрения составляет  $\pm 2$  мм в диапазоне до 50 м. Полученное значение сопоставимо с ошибкой прибора Trimble LaserTilt90:  $\pm 4$  мм на той же дистанции. Предложенный метод позволяет в перспективе реализовать определение полного вектора смещений на контролируемой точке с помощью предложенной измерительной системы с использованием лазерного луча в качестве опорного направления и средств технического зрения. Такое решение может быть

применено в системах геодезического мониторинга, где требуется контроль для ограниченного числа точек.

Целесообразность внедрения подобных систем геодезического мониторинга возрастает для зданий и сооружений, подверженных риску нарушения структурной целостности, а также для объектов, расположенных в удаленных районах, где регулярный доступ геодезистов затруднен. Для практического внедрения измерительных систем с использованием лазерного луча в качестве опорного направления и средств технического зрения требуются дополнительные исследования устойчивости к внешним воздействиям. Процедура калибровки по расстояниям может быть автоматизирована и выполняться с заданной периодичностью. В межкалибровочный период коэффициенты модели принимаются постоянными. Автоматизация калибровки возможна с применением алгоритмов технического зрения и подвижного экрана, формирующего эталонное смещение.

## благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

## библиография

1. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., et al. Climate Warming and Permafrost Thaw in the Russian Arctic: Potential Economic Impacts on Public Infrastructure by 2050 // *Natural Hazards*. 2022. Vol. 112. P. 231–251. DOI:10.1007/s11069-021-05179-6.
2. Curone D., Savarese G., Antonini M., et al. An Innovative Low-Power, Low-Cost, Multi-Constellation Geodetic-Grade Global Navigation Satellite System Reference Station for the Densification of Permanent Networks: The GREAT Project // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 13. P. 6032. DOI:10.3390/s23136032.
3. Blanch X., Guinau M., Eltner A., et al. Fixed Photogrammetric Systems for Natural Hazard Monitoring with High Spatio-Temporal Resolution // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 23. Iss. 10. P. 3285–3303. DOI:10.5194/nhess-23-3285-2023.
4. Zhuang Y., Chen W., Jin T., et al. A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 10. P. 3789. DOI:10.3390/s22103789.
5. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications // *Signals*. 2023. Vol. 4. Iss. 3. P. 539–574. DOI:10.3390/signals4030029.
6. Авхадеев В.Г., Можаров Г.А., Савостин П.И. и др. Лазерная измерительная сканирующая система для определения критических деформаций линейных объектов // *Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2019. Т. 63, № 6. С. 636–644. DOI:10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644.
7. Cao J., Chen Y., Yu D., et al. Real-Time Laser Spot Detection and Tracking System Based on Parallel Multi-Target Detection and Determination Algorithm // *Review of Scientific Instruments*. 2023. Vol. 94. P. 095007. DOI:10.1063/5.0157141.
8. Zhou Y., Wagner A., Wunderlich T., et al. Calibration Method for IATS and Application in Multi-Target Monitoring Using Coded Targets // *Journal of Applied Geodesy*. 2017. Vol. 11. Iss. 2. P. 99–106. DOI:10.1515/jag-2016-0021.
9. Zschiesche K., Schlüter M. Classification and Object Detection with Image Assisted Total Station and Machine Learning // *Journal of Applied Geodesy*. 2023. Vol. 17. Iss. 4. P. 381–389. DOI:10.1515/jag-2023-0011.
10. Wierzbicki S., Pióro Z., Osiniak M. Laser-Inclinometric Method for Displacement Measurements in Structural Health Monitoring // *Archives of Civil Engineering*. 2022. Vol. 68. Iss. 4. P. 607–616. DOI:10.24425/ace.2022.143057.
11. Vicente M., Gonzalez D., Minguez J., et al. A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 4. P. 970. DOI:10.3390/s18040970.
12. Zhao X., Liu H., Yu Y., et al. Bridge Displacement Monitoring Method Based on Laser Projection-Sensing Technology // *Sensors*. 2015. Vol. 15. Iss. 4. P. 8444–8463. DOI:10.3390/s150408444.

13. Portugal-Zambrano C.E., Mena-Chalco J.P. Robust Range Finder Through a Laser Pointer and a Webcam // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. 2011. Vol. 281. P. 143–157. DOI:10.1016/j.entcs.2011.11.031.
14. Сорокин М.И. Лазерный дальномер и 2D сканирование помещения // Аллея Науки. 2017. Т. 2, № 9. С. 877–888.
15. Янгальшев В.Р., Попков М.А., Наумов В.Ю. Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров // Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Международной научно-практической конференции. Тюмень: ТИУ, 2024. С. 182–186.

#### **авторы**    **Мареев Артем Владимирович**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия  
кафедра космической и физической геодезии, Институт геодезии и менеджмента  
канд. техн. наук  
 0000-0002-1216-5350

#### **Янгальшев Валентин Рамильевич**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия  
кафедра космической и физической геодезии, Институт геодезии и менеджмента

#### **Макеев Александр Викторович**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия  
кафедра специальных устройств, инноватики и метрологии,  
Институт оптики и технологий информационной безопасности

#### **Каргина Лидия Александровна**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ), Новосибирск, Россия  
кафедра космической и физической геодезии, Институт геодезии и менеджмента

Поступила 02.10.2025. Принята к публикации 24.04.2026. Опубликовано 30.04.2026.



# Distance Estimation Based on Laser Beam Divergence in Geodetic Monitoring Systems

**Artem V. Mareev<sup>1</sup>✉, Valentine R. Yangalishev<sup>1</sup>,  
Alexandr V. Makeev<sup>1</sup>, Lidia A. Kargina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
✉ a.v.mareev@sgugit.ru

**citation** Mareev AV, Yangalishev VR, Makeev AV, Kargina LA. Distance Estimation Based on Laser Beam Divergence in Geodetic Monitoring Systems. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(2): 20–33. DOI:10.30533/GiA-2026-013.

**keywords** computer vision, geodetic monitoring, alignment monitoring systems, laser spot tracking, open source, laser beam divergence

**abstract** An assessment is presented of the applicability of computer vision algorithms and software in observation systems for continuously operating geodetic monitoring. A method for determining linear displacements based on the divergence effect of a laser beam is considered, implemented within a measurement unit comprising a semiconductor laser, an ESP32-CAM microcontroller module with an OV2640 digital camera, and a matte screen. Experimental results confirm the capability to estimate distance variations between the laser source and the screen with an error of 2 mm over a range of 30 to 50 m. Video processing is performed using open-source software designed to detect and analyze the position of the laser spot on the camera matrix. Experimental data obtained under controlled conditions are provided for the verification and refinement of technical vision algorithms. The proposed solution enables continuous displacement monitoring and can be integrated into structural deformation monitoring systems. The use of low-cost components and open software enhances the system's accessibility for widespread deployment. The results contribute to improving the accuracy and autonomy of geodetic monitoring systems.

**acknowledgements** The research was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Education 'Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures by means of low-budget high-precision sensors of vertical movements in the Far North' (FEFS-2023-0003).

## references

1. Melnikov VP, Osipov VI, Brouchkov AV, et al. Climate Warming and Permafrost Thaw in the Russian Arctic: Potential Economic Impacts on Public Infrastructure by 2050. *Natural Hazards*. 2022;112: 231–251. DOI:10.1007/s11069-021-05179-6.
2. Curone D, Savarese G, Antonini M, et al. An Innovative Low-Power, Low-Cost, Multi-Constellation Geodetic-Grade Global Navigation Satellite System Reference Station for the Densification of Permanent Networks: The GREAT Project. *Sensors*. 2023;23(13): 6032. DOI:10.3390/s23136032.
3. Blanch X, Guinau M, Eltner A, et al. Fixed Photogrammetric Systems for Natural Hazard Monitoring with High Spatio-Temporal Resolution. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023;23(10): 3285–3303. DOI:10.5194/nhess-23-3285-2023.
4. Zhuang Y, Chen W, Jin T, et al. A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments. *Sensors*. 2022;22(10): 3789. DOI:10.3390/s22103789.
5. Ferraris C, Amprimo G, Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications. *Signals*. 2023;4(3): 539–574. DOI:10.3390/signals4030029.
6. Avkhadeev VG, Mozharov GA, Savostin PI, et al. Lazernaya izmeritel'naya skaniruyushchaya sistema dlya opredeleniya kriticheskikh deformatsii lineinykh ob'ektov [Laser Measuring Scanning System for Determination of Critical Deformations of Linear Objects]. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2019;63(6): 636–644. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2019-63-6-636-644.
7. Cao J, Chen Y, Yu D, et al. Real-Time Laser Spot Detection and Tracking System Based on Parallel Multi-Target Detection and Determination Algorithm. *Review of Scientific Instruments*. 2023;94: 095007. DOI:10.1063/5.0157141.
8. Zhou Y, Wagner A, Wunderlich T, et al. Calibration Method for IATS and Application in Multi-Target Monitoring Using Coded Targets. *Journal of Applied Geodesy*. 2017;11(2): 99–106. DOI:10.1515/jag-2016-0021.
9. Zschiesche K, Schlüter M. Classification and Object Detection with Image Assisted Total Station and Machine Learning. *Journal of Applied Geodesy*. 2023;17(4): 381–389. DOI:10.1515/jag-2023-0011.
10. Wierzbicki S, Pióro Z, Osiniak M. Laser-Inclinometric Method for Displacement Measurements in Structural Health Monitoring. *Archives of Civil Engineering*. 2022;68(4): 607–616. DOI:10.24425/ace.2022.143057.
11. Vicente M, Gonzalez D, Minguez J, et al. A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections. *Sensors*. 2018;18(4): 970. DOI:10.3390/s18040970.
12. Zhao X, Liu H, Yu Y, et al. Bridge Displacement Monitoring Method Based on Laser Projection-Sensing Technology. *Sensors*. 2015;15(4): 8444–8463. DOI:10.3390/s150408444.
13. Portugal-Zambrano CE, Mena-Chalco JP. Robust Range Finder Through a Laser Pointer and a Webcam. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. 2011;281: 143–157. DOI:10.1016/j.entcs.2011.11.031.
14. Sorokin MI. Lazernyy dal'nometr i 2D skanirovanie pomeshcheniya [Laser Rangefinder and 2D Indoor Scanning]. *Alley of Science*. 2017;2(9): 877–888. (In Russian).
15. Yangalyshev VR, Popkov MA, Naumov VY. Programma dlya kalibrovki malobudzhetnykh vysokotochnykh tsifrovyykh videoinklinometrov [Software for Calibration of Low-Budget High-Precision Digital Video Inclinometers]. *Oil and Gas: Technologies and Innovations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Tyumen: TIU; 2024: 182–186. (In Russian).

## authors

**Artem V. Mareev**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 Department of Space and Physical Geodesy, Institute of Geodesy and Management  
 PhD in Engineering,  
 0000-0002-1216-5350

**Valentine R. Yangalishev**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
 Department of Space and Physical Geodesy, Institute of Geodesy and Management

**Alexandr V. Makeev**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
Department of Special Devices, Innovatics, and Metrology,  
Institute of Optics and Information Security Technologies

**Lidia A. Kargina**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia  
Department of Space and Physical Geodesy, Institute of Geodesy and Management

**Submitted: October 2, 2025. Accepted: April 24, 2026. Published: April 30, 2026.**