

УДК 621.391.037.37

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРА ИМПУЛЬСА

W. Flores-Fuentes<sup>1</sup>, O. Sergiyenko<sup>1</sup>, J. C. Rodriguez-Quiñonez<sup>1</sup>,  
M. Rivas-López<sup>1</sup>, D. Hernández-Balbuena<sup>1</sup>, L. C. Básaca-Preciado<sup>2</sup>,  
L. Lindner<sup>1</sup>, F. F. González-Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Baja California,  
21280, Mexico, Mexicali, Blvd. Benito Juárez S/N

<sup>2</sup> CETYS Universidad,  
21259, Mexico, Mexicali, Rivera, Calz. Cetys S/N  
E-mail: flores.wendy@uabc.edu.mx

Рассмотрена проблема модернизации оптоэлектронной системы с цифровой постобработкой, основанной на соответствующих методах локализации центра импульса и на улучшенной методике динамической триангуляции в приложении к обнаружению дефектов промышленных объектов. Представлена модификация ранее предложенного нами метода локализации центра импульса в оптоэлектронном сигнале и показано применение алгоритма искусственного интеллекта для компенсации погрешности определения угловой координаты при вычислении пространственного местоположения методом динамической триангуляции. Разработаны и протестированы пять различных методов для определения наилучшего способа локализации центра импульса. После использования этих методов и проведения цифровой компенсации погрешности статистический анализ показал непараметрический характер полученных данных. Для последующего улучшения результата был использован критерий знаковых рангов Уилкоксона. Для оптической сканирующей системы применение метода локализации импульса обусловлено получением пространственной координаты источника света, закреплённого на исследуемом объекте.

*Ключевые слова:* анализ, центр импульса, компенсация, локализация, оптический метод.

DOI: 10.15372/AUT20160610

**Введение.** Оптоэлектронная сканирующая система (ОСС) была модернизирована с использованием прецизионного метода локализации центра импульса (ЛЦИ) оптического сигнала и двух оптических апертур в целях мониторинга состояния макроскопических объектов промышленной инфраструктуры: зданий, градирен, антенн, складов, гаражей, например их входов, прилегающей территории и аварийных выходов, и, в конечном счёте, для повышения безопасности промышленности в целом. Контроль точности оптоэлектронных сканеров — сложная и очень важная задача [1–4]. Один из наиболее применяемых подходов — использование метода динамической триангуляции и трёхмерного оптоэлектронного сканера [1, 5, 6]. Устройство, разработанное нашей исследовательской группой, нашло широкое практическое применение [1, 7, 8] благодаря таким преимуществам, как: больший угол обзора (в сравнении со статической триангуляцией с оптической матрицей), меньший объём информации, которую необходимо обрабатывать, и т. д. Однако, как впервые показано в [4] и далее в [1, 7], метод динамической триангуляции из-за сложной природы шума (наложения оптического, электромеханического и электронных шумов) генерирует выходные данные, для которых применение стандартных алгоритмов шумоподавления

неэффективно, и требует обязательной их постобработки. Такая постобработка логически разделяется на два блока, отвечающие за электромеханический и оптический шум. Первому блоку, основанному на обработке статистических данных с помощью нейросетевых алгоритмов, посвящены исследования [4, 9]. Методы, используемые во втором блоке, недостаточно разработаны из-за разнообразия подходов к решению этой важной проблемы. Некоторые частные её решения были предложены в [7, 8].

В данной работе рассматриваются проблема пространственного распределения световых источников и близкая ей проблема естественной неопределённости их местоположения, приводится список наиболее актуальных методов локализации центра импульса и сравнивается эффективность существующих методов на основе критерия Уилкоксона.

В связи с повышенным интересом к целостности конструкций происходит постоянное совершенствование подходов к контролю и предотвращению нежелательных повреждений [10]. Модернизированная ОСС состоит из невращающегося некогерентного источника света, размещённого на исследуемом объекте. Источник может крепиться под разными углами для определения положения объекта (пространственной координаты). Два пассивных вращающихся сенсора с оптической апертурой используются для динамической триангуляции. Каждая апертура снабжена зеркалом, закреплённым под углом  $45^\circ$ , и заключена в цилиндрический микростержень. Луч света отклоняется зеркалом в двояковыпуклую линзу и фильтруется для того, чтобы устранить помехи и улучшить фокус. Фотодиод регистрирует луч света, в то время как цилиндрический микростержень, закреплённый на штифте электромотора, работающего от постоянного напряжения, вращается. Данный элемент и генерирует сигнал, который анализируется рассматриваемыми методами [7, 11, 12]. Эти методы основаны на предположении, что сигнал ОСС, получаемый сканированием источника света, имеет форму гауссового распределения. Источник света можно считать точечным, однако из-за увеличения расстояния пучок света расширяется, образуется конусообразная или ещё более сложная форма в зависимости от свойств среды, в которой распространяется световое излучение. Для минимизации погрешностей в пространственных измерениях лучше всего проводить фиксацию положения объекта в центре импульса, генерируемого сканером, как было показано в [13], и применять метод опорных векторов для подстройки нелинейной вариации, возникающей при измерении в ОСС из-за нестабильности частоты сканирования, расстояния, углового расположения и нестыкровок взаимодействия вспомогательных методов, как в [14].

В данной работе анализируется выбор наилучшего метода нахождения центра импульса. Таким образом, главной задачей является расширенный анализ и полная перекрёстная проверка пяти основных методов, применяемых к рассматриваемым задачам. Ключевой аспект предлагаемой работы — не только попарное сравнение методов, как в [10], но и составление общего рейтинга по тем же критериям. Сравнение и ранжирование методов ЛЦИ было проведено с использованием критерия знаковых рангов Уилкоксона, который относится к непараметрическим критериям или критериям, не зависящим от типа распределения. Критерий применяется к методам попарно. Он проверяет нулевую гипотезу, заключающуюся в том, что среднее значение попарных разностей равно нулю, и может использоваться также при проверке предположения о принадлежности образца к выборке с заданным средним. Критерий знаковых рангов Уилкоксона учитывает величины разностей и таким образом оперирует большим количеством информации, чем обычный ранговый критерий, приводя, к заключениям, которые лучше отражают действительные свойства данных. Представленная работа содержит теоретические принципы методов ЛЦИ, описание экспериментальной установки, результаты проверки и статистический анализ методов динамической триангуляции, применяемой в модернизированной ОСС.

**Метод локализации центра импульса с помощью геометрического центраида.** На плоскости  $(t, v)$  ( $t$  — время,  $v$  — напряжение на фотодиоде) оптоэлектронный

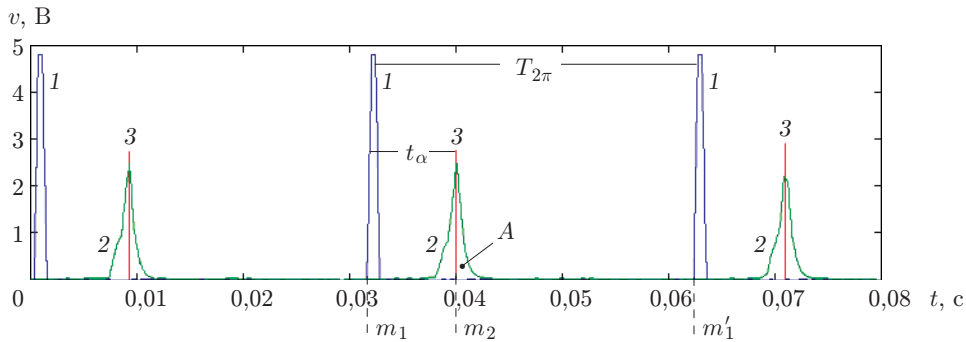


Рис. 1. Временные диаграммы ОСС: кривые 1 — синхрои́мпульс, 2 — оптоэлектронный сигнал, 3 — центр импульса

сигнал  $v = f(t)$  отсекает область  $A$  под кривой (рис. 1). По этой области определяется положение  $(\bar{t}, \bar{v})$  геометрического центра, где  $\bar{t}$  находится из выражения

$$\bar{t} = \int_a^b t dA / A = \int_a^b t v dt / \int_a^b v dt. \quad (1)$$

На рис. 1  $t = 0$  — исходное состояние ОСС,  $T_{2\pi}$  — время между последовательными синхрои́мпульсами  $m_1$  и  $m_1'$ ,  $t_\alpha$  — время между синхрои́мпульсом  $m_1$  и импульсом оптоэлектронного сигнала  $m_2$ , соответствующее  $\bar{t}$ . Зная количество отсчётов

$$N_{2\pi} = T_{2\pi} f, \quad (2)$$

$$N_\alpha = t_\alpha f, \quad (3)$$

где  $f$  — частота сканирования ОСС, можно вычислить искомую координату  $\alpha$  [7, 11, 12]:

$$\alpha = 2\pi(N_\alpha / N_{2\pi}). \quad (4)$$

**Метод локализации центра импульса с использованием центроида спектра мощности** применялся ранее для локализации центра импульса в [14]. Положение центроида соответствует максимальной концентрации мощности, переносимой волной (сигналом) на единицу частоты [15], и в пространстве частот выражается в виде

$$SC_{Hz} = \sum_{k=1}^{N-1} k X^d[k] / \sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]. \quad (5)$$

Здесь  $SC_{Hz}$  — спектральный центроид в частотной области (в Гц);  $X^d[k]$  — величина, соответствующая интервалу частот  $k$  (в Гц) шириной  $fs/N$  ( $fs$  — ширина спектра,  $N$  — количество точек дискретного преобразования Фурье (ДПФ)). Во временном пространстве центроид вычисляется как

$$TC = \sum_{n=1}^{L-1} n x[n] / \sum_{n=1}^{L-1} x[n], \quad (6)$$

где  $x[n]$  — входной сигнал;  $n$  — временной индекс;  $L$  — длина временного промежутка. Время одного цикла сканирования определяется стартовым сигналом, генерируемым в ОСС сенсором  $s$ . Между первым сигналом и вторым происходит полный оборот электри-

ческого двигателя. Эта последовательность из  $L$  временных отсчётов, отображённых в  $N$  частотных отсчётов преобразованием Фурье, представляет собой один кадр и называется спектром. Он связан с центром импульса во временной области, поскольку центроид спектра мощности является аналогом центра масс частотных компонент спектра. Такой центроид — это действительная неотрицательная функция (мощность на 1 Гц или энергия на 1 Гц) частоты, ассоциируемой со временем. Метод состоит из четырёх шагов: обработки данных с помощью преобразования Фурье для отображения их из временной плоскости в частотную; вычисления спектра мощности; вычисления центроида, соответствующего центральному значению в частотном спектре; обратного преобразования данной частоты во временную плоскость для определения точки, в которой располагается источник света.

**Метод аналоговой обработки** заключается в интеграции электронной схемы в фотодиодный сенсор [16] в целях определения центра импульса в оптическом сигнале, генерируемом ОСС [8]. Вначале операционный усилитель на основе JFET используется как пороговый детектор для преобразования оптоэлектронного гауссообразного сигнала в прямоугольный сигнал: пока оптоэлектронный сигнал ниже заданного напряжения, JFET генерирует отрицательное напряжение насыщения, а когда оптоэлектронный сигнал превышает заданное, JFET переключается в напряжение положительного насыщения. Затем JFET функционирует как сумматор для превращения прямоугольного сигнала в пилообразный так, чтобы центр импульса пришёлся на пересечение с нулевым уровнем, после этого компаратор с низким уровнем входного напряжения определяет момент времени, когда передний фронт сигнала пересекает нулевой уровень, соответствующий центру импульса. Наконец, на выходе из компаратора распаивается ряд резисторов и конденсаторов для получения импульсного сигнала на границах. В результате диод отфильтровывает импульсы, соответствующие заднему фронту сигнала, оставляя те, которые согласуются с центром энергетического спектра. На рис. 2 изображена взаимосвязь между исходным оптоэлектронным, прямоугольным, пилообразным, импульсным сигналами и сигналом на выходе из диода, соотносящимся с центром импульса.

**Метод нахождения центра импульса с помощью насыщения и интегрирования** является цифровой версией описанного выше аналогового метода. В нём оптоэлектронный сигнал обрабатывается рядом цифровых фильтров. Сигнал, зафиксированный фотодиодом, преобразуется следующим образом: устанавливается порог на оптоэлектронный сигнал, генерируемый источником света для измерения двух моментов времени пересечения порога (передний и задний фронт); полусумма этих времён соответствует центру импульса.

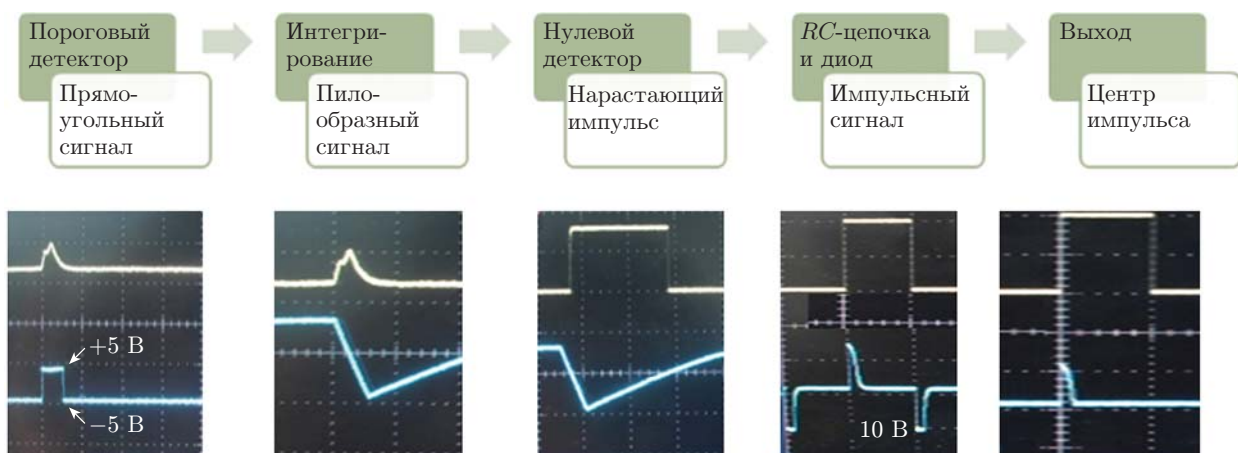


Рис. 2. Аналоговая обработка сигнала с помощью электронной схемы

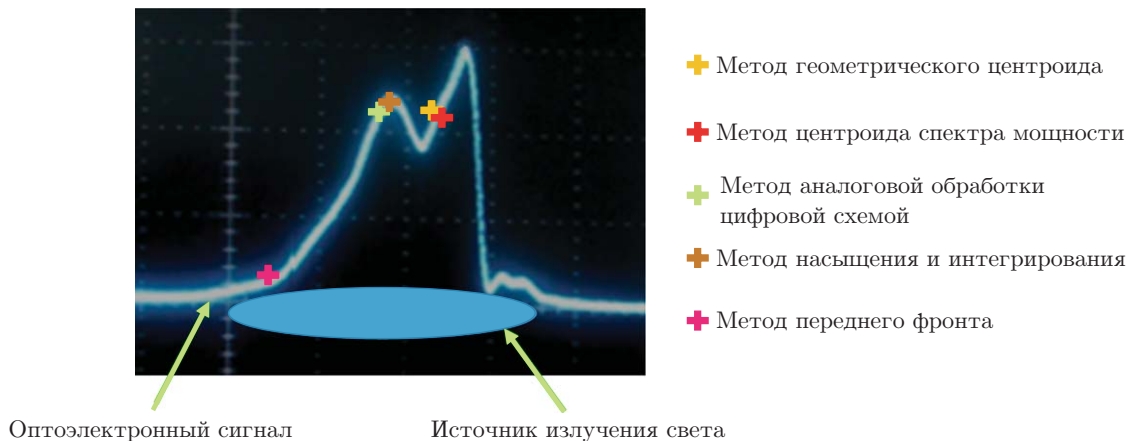


Рис. 3. Методы локализации центра импульса

**Метод нахождения центра импульса по переднему фронту сигнала** — самый простой из представленных методов — заключается в пороговом детектировании переднего фронта оптоэлектронного сигнала, регистрируемого ОСС. Сигнал, зафиксированный фотодиодом, обрабатывается алгоритмом, который устанавливает порог на оптоэлектронный сигнал, формируемый источником света, для того чтобы определить момент времени, когда сигнал достигает порогового уровня. Этот момент времени считается центром импульса. На рис. 3 изображены результаты применения описанных методов к оптоэлектронному сигналу, полученному ОСС.

Из многообразия методов нахождения центров и пиков сложных электрических сигналов отобраны наиболее рассматриваемые в литературе для решения задач, сходных с нашей. Их предварительная классификация и сравнение даны в [17].

**Коррекция погрешности измерения.** В каждом наборе измерений могут присутствовать различного рода погрешности, обусловленные как внешней средой, так и особенностями самого механизма. Систематические и случайные погрешности не подчиняются линейной зависимости, поскольку на их поведение влияет положение, т. е. угол и расстояние, а также частота сканирования. Поэтому цифровая коррекция с применением линейной функции не подходит для решения данной задачи. Вместо этого, как предлагалось в [14], используются функции аппроксимации погрешностей для цифровой коррекции с помощью хорошо известного алгоритма машинного обучения.

Погрешность предсказывается регрессионным методом опорных векторов и учитывается в качестве поправки для уменьшения итоговой погрешности.

**Регрессия с использованием метода опорных векторов (SVM).** Данный регрессионный метод применяется для предсказания значений сигнала в целом ряде практических приложений [18]. Один из примеров — оценка погрешности измерения в целях её коррекции [19–22]. Определив положение центра импульса и зная истинное расположение образца, можно записать

$$E = \alpha_t - \alpha_m, \quad (7)$$

где  $E$  — погрешность измерения, обозначающая степень расхождения измеренного значения с реальным;  $\alpha_m$  — угол, измеренный системой;  $\alpha_t$  — истинное значение угла. Измерения проводились для 18 различных углов и на 30 различных расстояниях от ОСС для каждого угла. Во всех случаях был получен гауссоподобный оптоэлектронный сигнал и проведена постобработка с помощью следующих методов: геометрического центра, центра спектра мощности, насыщения и интегрирования, переднего фронта, а также аналогового метода, в котором результат считывался с выхода электронной схемы.

Таблица 1

Методы ЛЦИ с регрессионным SVM	СКО	Коэффициент $R$ -корреляции
Геометрического центроида	0,026	0,909
Центроида спектра мощности	0,026	0,934
Аналоговой обработки цифровой схемой	0,028	0,879
Насыщения и интегрирования	0,026	0,895
Переднего фронта	0,025	0,892

Результаты были записаны в виде матрицы, где каждая строка соответствует одному положению (углу и расстоянию), каждый столбец — базовой частоте, а в ячейках приведены погрешности измерения применяемых методов для этого положения и частоты. Такой набор данных был сформирован для всех методов. Далее каждый набор разделялся на обучающую и тестовую выборки. Всякий элемент обучающей выборки содержал одно целевое значение (погрешность измерения) и три атрибута (характеристики): угол, расстояние и частоту. Наборы данных использовались для обучения и тестирования алгоритма SVM, предсказывающего погрешность измерения [8].

В результате применения полученной модели регрессионного SVM с наилучшими параметрами к независимым тестовым выборкам были найдены предсказанные значения. Далее вычислялись коэффициенты  $R$ -корреляции, попавшие в диапазон от 0,879 до 0,936, что можно считать удовлетворительным результатом для всех методов и особенно для метода центроида спектра мощности, как показано в табл. 1 [22]. Наконец, предсказанная погрешность добавлялась к измеренному значению

$$\alpha_{mc} = \alpha_m + E_p, \quad (8)$$

где  $\alpha_{mc}$  — скорректированный угол (цифровая компенсация);  $E_p$  — предсказанная погрешность.

**Нестатистический анализ методов ЛЦИ.** Сравнение методов ЛЦИ с помощью СКО проводилось до и после коррекции погрешности, результаты представлены в табл. 2. Кроме того, количественно анализировались диапазоны погрешностей, которые до цифровой коррекции и после неё были сгруппированы по трём диапазонам. Количественный анализ приведён в табл. 3, где видно улучшение точности всех методов.

Помимо этого был вычислен коэффициент  $R$ -корреляции для измеренных и истинных величин (как до, так и после цифровой коррекции) (табл. 4). Из таблицы следует, что лучшими являются метод геометрического центроида и метод насыщения и интегрирования.

**Статистический анализ** — объективная процедура, с помощью которой экспериментальный результат может подтвердить либо опровергнуть гипотезу путём задания

Таблица 2

Методы ЛЦИ	СКО до компенсации погрешностей	СКО после компенсации погрешностей	Номер в порядке возрастания ошибки
Геометрического центроида	8,5	1,47	1
Центроида спектра мощности	18,07	2,22	5
Аналоговой обработки цифровой схемой	9,21	2,05	4
Насыщения и интегрирования	9,23	1,58	2
Переднего фронта	24,17	1,63	3

Таблица 3

Методы ЛЦИ	До коррекции погрешности			После коррекции погрешности			Номер в порядке ухуд- шения результатов
	$E < 3,0^\circ$	$3,0 < E < 5,99^\circ$	$E > 6,0^\circ$	$E < 3,0^\circ$	$3,0 < E < 5,99^\circ$	$E > 6,0^\circ$	
Геометрического центроида	68,79 %	28,29 %	2,82 %	98,45 %	1,55 %	0,00 %	1
Центроида спектра мощности	59,39 %	28,81 %	17,80 %	95,90 %	3,81 %	0,28 %	5
Аналоговой обработки цифровой схемой	66,95 %	28,95 %	4,10 %	96,75 %	3,25 %	0,00 %	4
Насыщения и интегрирования	68,22 %	26,84 %	4,94 %	97,60 %	2,40 %	0,00 %	2
Переднего фронта	0,00 %	0,00 %	100,00 %	97,60 %	2,40 %	0,00 %	3

соответствующей вероятностной функции. Поскольку измерения являются выборкой из статистического распределения, а не самим распределением, даже если эта выборка была проведена случайным образом, всегда есть риск принятия неверного решения при выборе лучшего метода, так как её характеристики могут отличаться от характеристик распределения. Риск оценивается с помощью критерия знаковых рангов Уилкоксона.

**Непараметрическое распределение данных.** Статистические критерии можно разделить на параметрические и непараметрические. Для параметрических критериев рассматриваемая выборка должна удовлетворять некоторым условиям в соответствии со статистической моделью, кроме того, необходимо вычислять доверительные интервалы. Непараметрические критерии не требуют выполнения этих условий. На рис. 4 представ-

Таблица 4

Методы ЛЦИ	Коэффициент $R$ -корреляции до коррекции погрешности	Коэффициент $R$ -корреляции после коррекции погрешности	Номер в порядке ухудшения результатов
Геометрического центроида	0,9964	0,9992	1
Центроида спектра мощности	0,9928	0,9989	4
Аналоговой обработки цифровой схемой	0,9960	0,9989	5
Насыщения и интегрирования	0,9964	0,9991	2
Переднего фронта	0,9994	0,9991	3

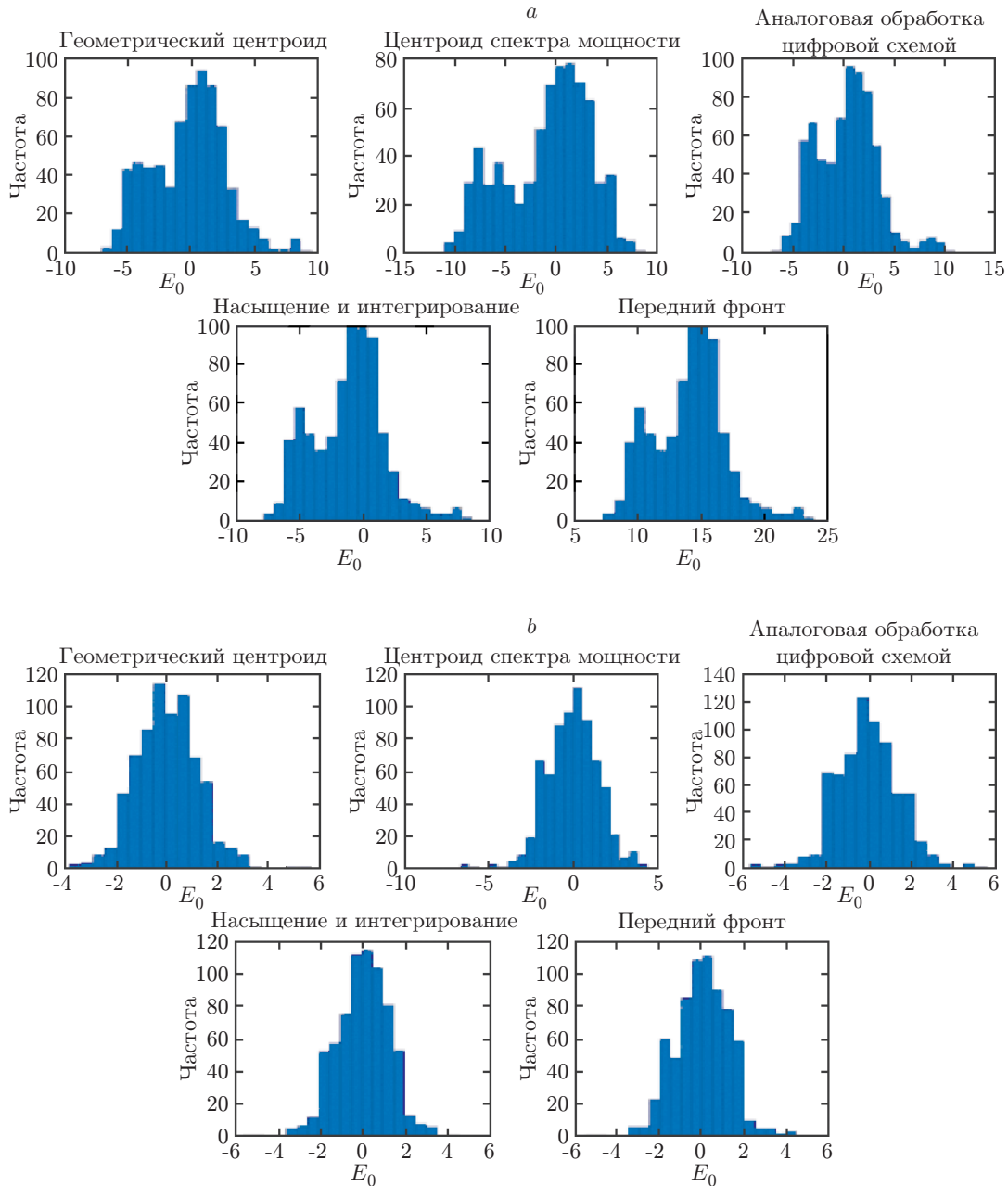


Рис. 4. Непараметрическое распределение погрешностей: *a* — без компенсации, *b* — с компенсацией

лены исходные распределения погрешностей и итоговое распределение, вычисленные по следующим формулам:

$$E_0 = \alpha_m - \alpha_t, \tag{9}$$

$$E_f = \alpha_{mc} - \alpha_t, \tag{10}$$

где  $E_0$  — исходная погрешность;  $E_f$  — погрешность после коррекции.

**Критерий рангов Уилкоксона.** Как было показано выше, распределение данных имеет непараметрический характер. Учитывая синхронность всех полученных результатов (измерения во всех положениях сделаны в одно и то же время и обработаны всеми методами), целесообразно применять критерий рангов Уилкоксона. Гипотеза  $H_0$  заключа-



Таблица 5

Методы ЛЦИ	Коэффициенты				Номер в порядке ухудшения результата
	$p$	$H$	$z$	$T$	
Геометрического центроида	0,32	0	-0,99	120078	1
Центроида спектра мощности	0,00	1	-3,31	107451	2
Аналоговой обработки цифровой схемой	0,00	1	-3,47	106612	3
Насыщения и интегрирования	0,00	1	-10,06	70719	4
Переднего фронта	0,00	1	-23,05	0	5

ется в нулевой разности между измеренными и опорными значениями. Набор измерений должен быть проанализирован и проверен на соответствие нулевой гипотезе. Кроме  $H_0$  рассмотрим альтернативную гипотезу  $H_1$ , которая должна включать предположения об исследуемом объекте. Согласно гипотезе  $H_0$  среднее арифметическое от измерений угла, обработанных пятью различными методами, не имеет статистически значимых отличий от истинного значения измеряемого угла. Гипотеза  $H_1$ , наоборот, предполагает наличие отклонения среднего арифметического значения от истинного. Уровень достоверности  $\alpha$  выбирается для проверки статистического критерия (вероятность отклонения гипотезы  $H_0$ ). Он соответствует уровню значимости риска ошибочного принятия гипотезы  $H_1$ . Произвольным образом для всех случаев взяты значения 0,05 и 0,01, соответствующие вероятностям 0,95 и 0,91 принятия гипотезы  $H_0$ . Решение в пользу той или иной гипотезы может оказаться ложным, приводя к ошибке первого рода (ложноположительный результат) или второго рода (ложноотрицательный результат) согласно положениям [23].

**Сравнение методов обработки с использованием критерия знаковых рангов Уилкоксона.** Чтобы определить метод, наиболее подходящий для модернизированной ОСС (приводящий к наименьшей погрешности измерения), все погрешности были вычислены согласно (9) без коррекции и по формуле (10) с цифровой коррекцией. Для тестирования гипотезы о принадлежности данных из вектора  $X$  (погрешностей) распределению с нулевым средним к ним был применён критерий знаковых рангов Уилкоксона с нулевым средним из пакета MATLAB. Результаты представлены в табл. 5 и 6, где  $p$  — вероятность получения результата в случае, если гипотеза  $H_0$  истинна и вычислена в предположении о нормальности распределения;  $H = 0$  означает, что гипотеза  $H_0$  не может быть отклонена на уровне 5 %,  $H = 1$  — гипотеза  $H_0$  может быть отклонена на уровне 5 %; в столбце  $z$  приведены значения  $Z$ -характеристики, в столбце  $T$  — значения характеристики знаковых рангов.

Таблица 6

Методы ЛЦИ	Коэффициенты				Номер в порядке ухудшения результата
	$p$	$H$	$z$	$T$	
Геометрического центроида	0,62	0	-0,50	584414	2
Центроида спектра мощности	0,86	0	-0,18	124526	1
Аналоговой обработки цифровой схемой	0,24	0	-1,17	119132	4
Насыщения и интегрирования	0,38	0	-0,87	120742	3
Переднего фронта	0,09	0	-1,68	116354	5

**Заключение.** В работе [14] наглядно показано, что методы геометрического центроида и центроида спектра мощности ведут себя аналогично. Непараметрический статистический анализ с использованием критерия знаковых рангов Уилкоксона подтвердил схожесть результатов обоих методов. Однако метод геометрического центроида показал требуемые результаты по всем параметрам. Было продемонстрировано, что эти методы являются лучшими способами для определения центра импульса сигнала ОСС. Далее следует метод определения координат с помощью электронной схемы и его вычислительный аналог (метод насыщения и интегрирования).

Из табл. 6 видно, что единственный метод, который удовлетворяет гипотезе  $H_0$  без компенсации погрешности, — метод геометрического центроида. После коррекции погрешности все методы удовлетворяют гипотезе  $H_0$ , но лучший результат показывает метод центроида спектра мощности, и затем — метод геометрического центроида.

В результате получена улучшенная динамическая триангуляционная методика обнаружения повреждений промышленных объектов с применением ранее опубликованных методов нахождения центра импульса в оптоэлектронном сигнале и обработки их результатов путём коррекции погрешности угловых измерений с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Пространственная координата определяется с помощью динамической триангуляции для мониторинга состояния промышленных объектов путём регистрации сигналов источников света оптическим бесконтактным сканированием. Данный метод может быть использован в целях повышения безопасности работ в различных областях промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сергиенко О. Ю.** Оптоэлектронная навигационная система робота // Автометрия. 2010. **46**, № 5. С. 18–35.
2. **Tippett J. T., Borkowitz D. A., Clapp L. C. et al.** Optical and Electro-optical Information Processing. Cambridge: The Massachusetts Institute of Technology, 1965. 800 p.
3. **Korayem M. H., Heidari F. S.** Simulation and experiments for a vision-based control of a 6R robot // The Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol. 2009. **41**, Is. 3. P. 367–385.
4. **Rodriguez-Quinonez J. C., Sergiyenko O., Hernandez-Balbuena D. et al.** Improve 3D laser scanner measurements accuracy using a FFBP neural network with Widrow-Hoff weight/bias learning function // Opto-Electron. Rev. 2014. **22**, Is. 4. P. 224–235.
5. **Basaca-Preciado L. C., Sergiyenko O. Yu., Rodriguez-Quinonez J. C. et al.** Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot // Opt. and Lasers in Eng. 2014. **54**. P. 159–169.
6. **Sergiyenko O. Yu., Tyrsa V. V., Devia L. F. et al.** Dynamic laser scanning method for mobile robot navigation // Proc. of the ICROS-SICE Intern. Joint Conf. Fukuoka, Japan, 2009. P. 4884–4889.
7. **Rivas-Lopez M., Sergiyenko O. Yu., Tyrsa V. et al.** Optoelectronic method for structural health monitoring // Struct. Health Monitoring. 2010. **9**, Is. 2. P. 105–120. DOI: 10.1177/1475921709340975.
8. **Flores-Fuentes W., Rivas-Lopez M., Sergiyenko O. et al.** Energy center detection in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement // IEEE Sensors Journ. 2014. **14**, Is. 7. P. 2355–2361. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2310224.
9. **Rodriguez-Quinonez J. C., Sergiyenko O., Gonzalez-Navarro F. F. et al.** Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg — Marquardt method // Signal Processing. 2012. **93**, Is. 2. P. 378–386.

10. **Bao Y., Li H., Sun X. et al.** Compressive sampling based data loss recovery for wireless sensor networks used in civil structural health monitoring // *Struct. Health Monitoring*. 2012. **12**, Is. 1. P. 78–95.
11. **Optoelectronics: Advanced Materials and Devices** /Eds. S. L. Pyskin, J. M. Ballato. Rijeka, Croatia: InTech, 2013. 494 p. Ch. 16: A method and electronic device to detect the optoelectronic scanning signal energy centre /M. Rivas-Lopez, W. Flores-Fuentes, J. Rivera-Castillo et al. P. 391–419. DOI: 10.5772/51993.
12. **Rivas-Lopez M., Sergiyenko O., Aguirre M. et al.** Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task // *Proc. of the IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics*. Cambridge, United Kingdom, 2008. P. 1458–1462. DOI: 10.1109/ISIE.2008.4676974.
13. **Flores-Fuentes W., Rivas-Lopez M., Sergiyenko O., Rivera-Castillo J.** Comparison of signal peak detection algorithms in the search of the signal energy center for measuring with optical scanning // *Proc. of the IEEE XXII Intern. Conf. on Communications, Computer, Electronics, Automation, Robotics and Industrial Exposition*. Guerrero, Mexico, 2011.
14. **Flores-Fuentes W., Rivas-Lopez M., Sergiyenko O. et al.** Combined application of power spectrum centroid and support vector machines for measurement improvement in optical scanning systems // *Signal Processing*. 2014. **98**. P. 37–51.
15. **Park T. H.** *Introduction to Digital Signal Processing: Computer Musically Speaking*. Singapore: World Scientific, 2009. 452 p.
16. **Батраков А. М., Ильин И. В., Павленко А. В.** Прецизионные цифровые интеграторы сигналов с точной синхронизацией // *Автометрия*. 2015. **51**, № 1. С. 62–69.
17. **Palshikar G. K.** Simple algorithms for peak detection in time-series // *Proc. of the 1st Intern. Conf. Advanced Data Analysis, Business Analytics and Intelligence*. Ahmedabad, India, 2009. P. 1–13.
18. **Gascon-Moreno J., Ortiz-Garcia E. G., Salcedo-Sanz S. et al.** Multi-parametric gaussian kernel function optimization for  $\varepsilon$ -SVMr using a genetic algorithm // *Adv. in Comput. Intell. Ser. Lecture Notes in Comput. Sci.* Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. Vol. 6692. P. 113–120. DOI: 10.1007/978-3-642-21498-1\_15.
19. **Choi J. K., Park S. H., Cho D. J., Seo K. Y.** Correction error generation algorithm for differential positioning performance analysis of navigation equipment // *Proc. of the Intern. Conf. Control, Automation and Systems*. Seoul, South Korea, 2008. P. 1099–1103.
20. **Hsu C.-W., Chang C.-C., Lin C.-J.** A practical guide to support vector classification // *Tech. Rep.* 2003. 16 p. URL: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf> (дата обращения: 07.11.2016).
21. **Duin R. P. W., Juszczak P., Paclik P. et al.** *PRTTools4: A MATLAB Toolbox for Pattern Recognition*. Ver. 4.1. 2007. 61 p. URL: <http://www.prttools.org/files/PRTTools4.1.pdf> (дата обращения: 07.11.2016).
22. **Perez-Cruz F., Bousquet O.** Kernel methods and their potential use in signal processing // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2004. **21**, Is. 3. P. 57–65.
23. **Devore J. L.** *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Boston, USA: Cengage Learning, 2015. 792 p.

*Поступила в редакцию 2 сентября 2015 г.*