

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.396.96

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-8

Калибровка оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков

С. М. Зуев¹, И. Ю. Константинов²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский
автомобильный и автотранспортный институт «НАМИ», Москва, Россия

¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является оптико-электронная система на основе инфракрасных (ИК) датчиков. Предметом исследования выступает методика калибровки данной системы. Цель – разработка и представление методики адаптивной калибровки, учитывающей влияние внешних факторов (таких как освещенность и температура), для повышения точности и надежности измерений. *Материалы и методы.* Исследования проведены с использованием математического моделирования, в частности метода степенной аппроксимации и метода наименьших квадратов. Выполнено моделирование работы системы в среде MATLAB/Simulink и проведены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях. Обработка данных и управление системой осуществлялись с использованием микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad. *Результаты.* Представлена методика калибровки, основанная на математических моделях, описывающих зависимость выходного напряжения ИК-датчиков от расстояния до объекта. Проведен анализ влияния внешних условий. Введены и рассчитаны корректирующие коэффициенты, позволяющие динамически адаптировать измерительную систему к изменяющимся условиям эксплуатации. *Выводы.* Анализ результатов моделирования и экспериментальных данных показал, что предложенный подход к адаптивной калибровке позволяет значительно повысить точность и надежность измерений. Разработанная методика может быть применена для улучшения работы систем автономной навигации, медицинских сенсорных устройств и промышленных измерительных комплексов.

Ключевые слова: инфракрасные датчики, калибровка, оптико-электронные системы, адаптивная коррекция, обработка данных

Для цитирования: Зуев С. М., Константинов И. Ю. Калибровка оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков // Известия высших учебных заведений.

© Зуев С. М., Константинов И. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Calibration of the optical-electronic system based on infrared sensors**S.M. Zuev¹, I.Yu. Konstantinov²**^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia¹The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMI”, Moscow, Russia¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is an optoelectronic system based on infrared (IR) sensors. The subject of the study is the calibration methodology of this system. The purpose of the work is to develop and present an adaptive calibration methodology that takes into account the influence of external factors (such as illumination and temperature) to improve the accuracy and reliability of measurements. *Materials and methods.* The research was carried out using mathematical modeling, in particular, the power approximation method and the least squares method. The system was modeled in MATLAB/Simulink and experimental studies were carried out in laboratory and field conditions. Data processing and system control were carried out using the Tiva C Series LaunchPad microcontroller. *Results.* The calibration method is presented, based on mathematical models describing the dependence of the output voltage of the IR sensors on the distance to the object. The analysis of the influence of external conditions is carried out. The correction factors are introduced and calculated, allowing the dynamic adaptation of the measuring system to the changing operating conditions. *Conclusions.* Analysis of the simulation results and experimental data showed that the proposed approach to adaptive calibration can significantly improve the accuracy and reliability of measurements. The developed methodology can be applied to improve the operation of autonomous navigation systems, medical sensor devices and industrial measuring systems.

Keywords: infrared sensors, calibration, optical-electronic systems, adaptive correction, data processing

For citation: Zuev S.M., Konstantinov I.Yu. Calibration of the optical-electronic system based on infrared sensors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):112–124. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-8

Введение

Калибровка инфракрасных датчиков – это ключевой процесс, обеспечивающий точность измерений в мониторинге окружающей среды, промышленности и медицине, требующий учета влияния температуры, атмосферных условий и дрейфа характеристик [1–3]. Процесс включает коррекцию усиления и создание эталонных данных, а для его оптимизации применяются системы управления калибровкой (CMS), соответствующие стандартам [4]. Основные сложности связаны с перекрестной чувствительностью и изменяющимися условиями эксплуатации, но автоматизация и интеллектуальные технологии открывают новые возможности [5, 6]. Интеграция инфракрасных датчиков с лидарными и фотодиодными системами, а также использование микроконтроллеров позволяет повысить эффективность работы и выявить архитектурные ограничения [7, 8]. Развитие ассистивных технологий для людей с ослабленным зрением требует системного подхода и интеграции компьютерного зрения и микроэлектроники с учетом городской инфраструктуры [9].

Методология

Калибровка инфракрасных (ИК) датчиков проводилась в различных условиях (нормальных, при тусклом свете, при -2 и $+30$ °C) для двух типов датчиков: короткодействующего (10–80 см) и дальнедействующего (20–150 см). Измерялись расстояние до объекта (D , см) и выходное напряжение (V , В), рассчитывались статистические показатели (среднее, медиана, стандартное отклонение, коэффициент вариации), а достоверность данных проверялась с помощью критерия трех сигм, теста Граббса и теста Шапиро – Уилка [10]. Анализ погрешностей включал расчет среднеквадратичной и средней абсолютной ошибки, коэффициента детерминации, а также сравнение моделей методом наименьших квадратов с критериями AIC и BIC. Для оценки значимости различий использовались ANOVA и тест Крускала – Уоллиса. Аппроксимация выполнялась степенной функцией $V = a \cdot D^{-b}$, корректирующие коэффициенты определялись как $V_{\text{expected}}/V_{\text{measured}}$. В результате разработана адаптивная система калибровки, учитывающая реальные условия эксплуатации, что повысило точность измерений и обоснованность их обработки [11, 12].

Результаты

В ходе работы исследовалось фотоприемное устройство, преобразующее оптический сигнал в электрический. Основу системы составляет микроконтроллер Tiva C Series LaunchPad (ЕК-ТМ4С123GXL), обеспечивающий обработку сигналов и управление устройствами (рис. 1).

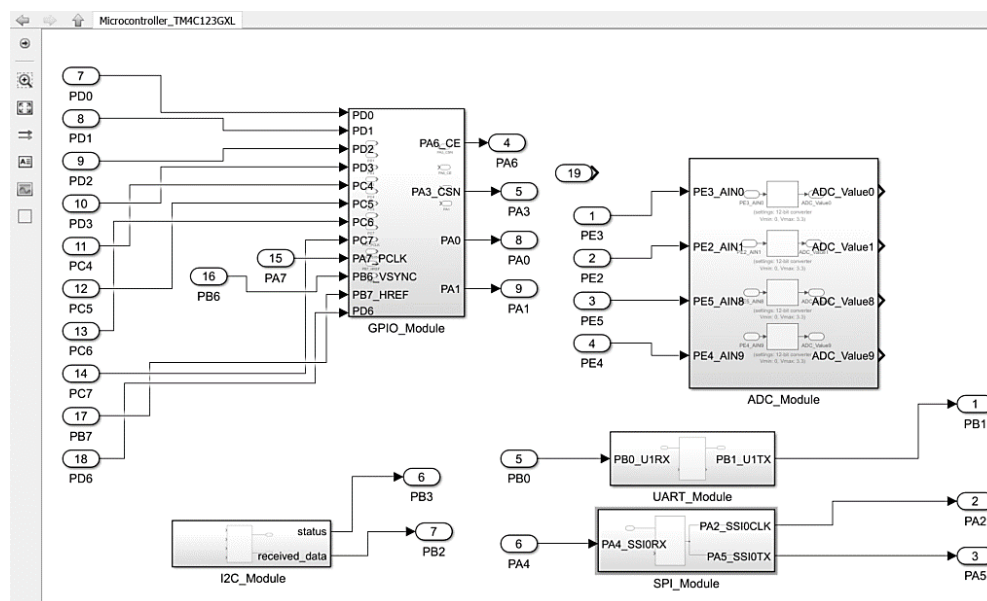


Рис. 1. Схема микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad (EK-TM4C123GXL)

Аналого-цифровой преобразователь (ADC) с разрешением 12 бит конвертирует аналоговые сигналы сенсоров в цифровые данные. Для передачи информации используются интерфейсы UART, SPI и I2C.

где y_n – расстояние по ходу (вперед от пользователя); x_n – боковое смещение (отрицательное значение – слева).

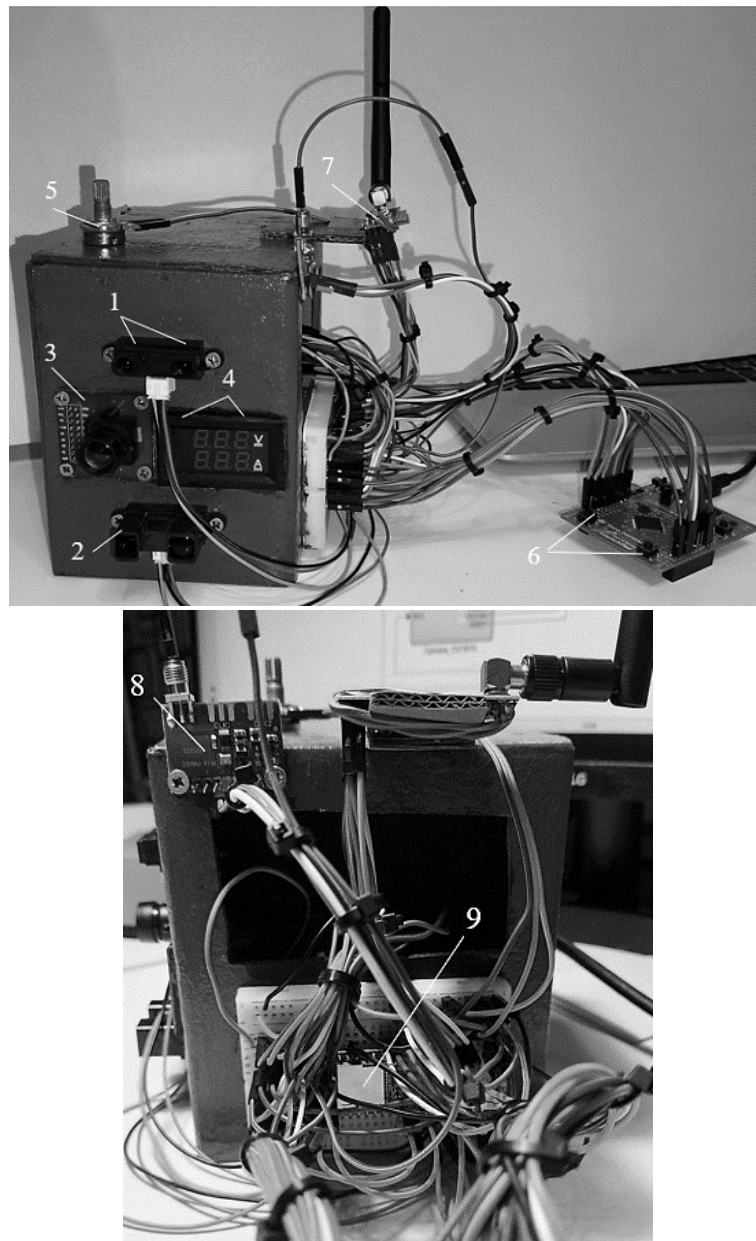


Рис. 3. Общий вид опто-электронной установки: 1 – ближнедействующий ИК-датчик; 2 – дальнедействующий ИК датчик; 3 – камера OV7670; 4 – вольтметр; 5 – потенциометр; 6 – микроконтроллер Tiva C Series; 7 – модуль передачи данных nRF24L01; 8 – генератор частот; 9 – аудиомодуль DFPlayer Mini

Модуль скорости определяется по формуле вида

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} . \quad (4)$$

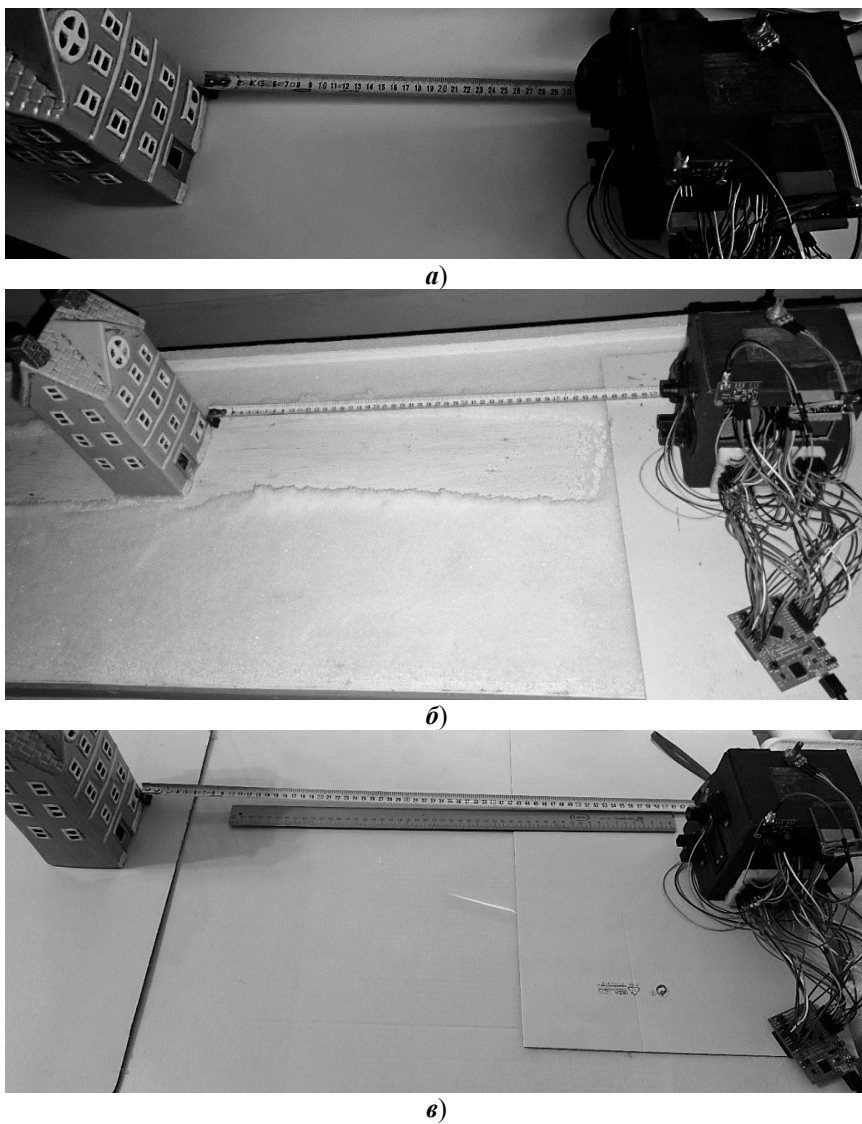


Рис. 4. Экспериментальная установка при слабом освещении (а);
экспериментальная установка на улице при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б)
и экспериментальная установка при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в)

Таблица 1

Напряжения на короткодействующем датчике

D , см	$V_{\text{expected_short}}$, В (нормальные условия)	$V_{\text{meas_short}}$, В (тусклая лампа)	$V_{\text{meas_short}}$, В (на улице при $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$V_{\text{meas_short}}$, В (при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
10	1,2	1,25	1,15	1,18
20	0,62	0,65	0,60	0,61
30	0,42	0,45	0,40	0,42
40	0,32	0,34	0,31	0,32
50	0,26	0,27	0,25	0,26
60	0,22	0,23	0,21	0,22
80	0,17	0,18	0,16	0,17

Таблица 2

Напряжения на дальнотействующем датчике

D , см	$V_{\text{expected_long}}$, В (нормальные условия)	$V_{\text{meas_long}}$, В (тусклая лампа)	$V_{\text{meas_long}}$, В (на улице при -2°C)	$V_{\text{meas_long}}$, В (при температуре 30°C)
85	0,38	0,39	0,37	0,39
100	0,30	0,34	0,32	0,34
110	0,30	0,32	0,29	0,31
120	0,28	0,29	0,27	0,29
130	0,26	0,27	0,25	0,27
140	0,25	0,26	0,24	0,25

Таблица 3

Корректирующие коэффициенты для короткотействующего датчика

D , см	k_{V_short} (тусклая лампа)	k_{V_short} (на улице при -2°C)	k_{V_short} (при температуре 30°C)
10	0,96	1,04	1,02
20	0,96	1,04	1,02
30	0,94	1,06	1,02
40	0,96	1,04	1,02
50	0,97	1,05	1,03
60	0,98	1,05	1,01
80	0,95	1,04	1,01
Среднее значение	0,96	1,05	1,02

Таблица 4

Корректирующие коэффициенты дальнотействующего датчика

D , см	k_{V_long} (тусклая лампа)	k_{V_long} (на улице при -2°C)	k_{V_long} (при температуре 30°C)
85	0,97	1,02	0,98
100	0,97	1,04	0,98
110	0,96	1,04	0,97
120	0,97	1,04	0,98
130	0,96	1,05	0,97
140	0,96	1,05	0,98
150	0,96	1,05	0,98
Среднее значение	0,96	1,04	0,98

Угол направления θ дает понимание ориентации вектора движения и вычисляется по формуле

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right). \quad (5)$$

Это позволяет предсказывать будущие координаты препятствий по формуле

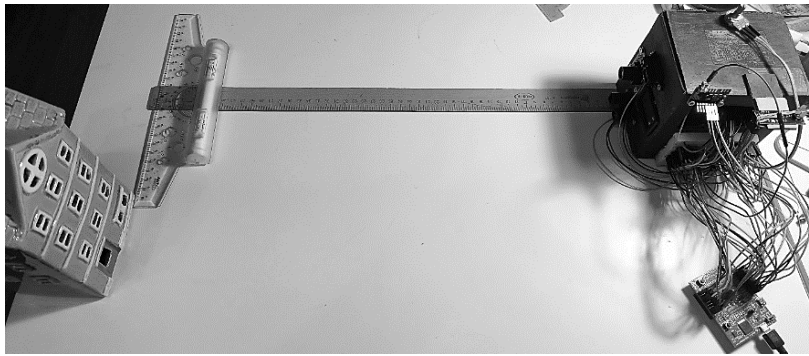
$$x_{pred} = x_{n+1} + v_x \Delta T, \quad y_{pred} = y_{n+1} + v_y \Delta T \quad (6)$$

и своевременно реагировать на возможные угрозы.

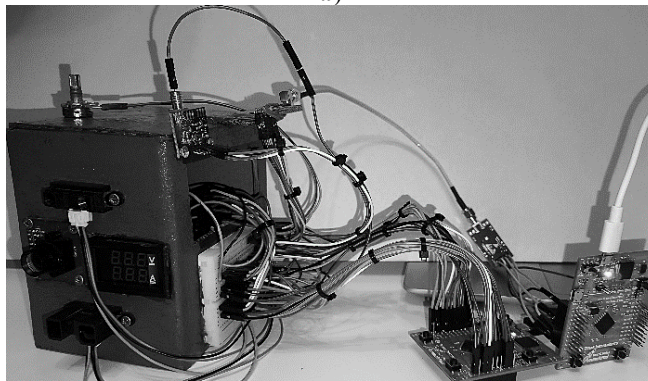
Таким образом, предложенный комплексный подход повышает точность измерений и адаптивность системы в изменяющихся условиях.

Экспериментальные исследования и обсуждение

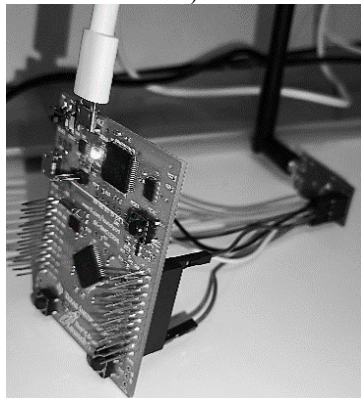
Экспериментальная установка для прогнозирования траектории препятствий представлена на рис. 5.



a)



b)



c)

Рис. 5. Экспериментальная установка для прогнозирования траектории препятствий (a). Устройство (b) принимает 16-байтные пакеты по адресу E7 E7 E7 E7 E7 E7 на канале 2 и выводит принятые данные в UART (c)

Система способна оценивать положение препятствия в координатной системе, где ось Y направлена вперед по ходу движения пользователя, а ось X – влево-вправо. Систему можно настроить так, что камера и датчики совместно дают оценку расстояния до препятствия и его бокового смещения.

Время обновления кадров: $\Delta t = 0,1$ с (кадры каждые 100 мс). В момент времени $t_n = 0$ система определила, что расстояние до препятствия 50 см вперед и препятствие смещено влево на 10 см относительно центральной оси взгляда

Через $\Delta t = 0,1$ с (через один кадр, $t_{n+1} = 0,1$): расстояние теперь 48 см, боковое смещение уменьшилось до 8 см влево (т.е. $x_n + 1 = -0,08$ м; $y_n + 1 = 0,48$ м). Далее рассчитаны скорости по осям $v_x = 0,2$ м/с, $v_y = -0,2$ м/с. Отрицательная скорость по Y означает, что препятствие приближается к пользователю (уменьшение дистанции по ходу). Полная скорость препятствия, рассчитанная по формуле, равна $\approx 0,28$ м/с.

Угол направления θ относительно оси Y (вперед). Примем, что $\theta = 0$ – движение строго вперед, положительный угол вправо. Угол равен 45° , но надо учесть знак v_y ; v_y отрицательный – объект движется к пользователю (назад по оси Y). Если считать вперед по Y – это положительное направление, а препятствие идет «назад» (к нам), то угол может интерпретироваться как движение под углом 45° в направлении «назад-вправо» относительно оси наблюдателя.

Прогнозирование положения можно получить, зная скорость и направление, можно предсказать положение через время ΔT . Например, через 0,5 с мы можем рассчитать положение по формуле, получаем $x_{\text{pred}} = 0,02$ м, $y_{\text{pred}} = 0,38$ м. Это значит, что через 0,5 с препятствие будет на расстоянии 0,38 м по ходу и смещено вправо на 0,02 м от центральной оси.

Рассмотрим передачу данных и анализ статистики. Требуется отправлять данные о столкновениях, частоте появления препятствий и типичных дистанциях для улучшения алгоритмов.

Сбор статистики включается в себя:

- количество срабатываний датчика на определенном расстоянии D_i ;
- частоту появлений препятствий f_i в разных диапазонах;
- количество столкновений (C).

Среднее расстояние обнаружения препятствий:

$$\bar{D} = \frac{\sum (D_i \cdot n_i)}{\sum n_i}, \quad (7)$$

где n_i – число срабатываний на расстоянии D_i .

Частота столкновений за период T :

$$\lambda = \frac{C}{T}. \quad (8)$$

Далее анализируется распределение расстояний до препятствий; рассчитаем дисперсию по формуле

$$\sigma_D^2 = \frac{\sum n_i (D_i - \bar{D})^2}{\sum n_i}. \quad (9)$$

Эффективность адаптивной калибровки и предсказания движения зависит от анализа статистики. За 1 ч система дважды фиксировала столкновения, а каждые 10 с регистрировала наличие препятствий. Из 360 измерений в 200 случаях обнаружено препятствие ($D < 150$ см), причем основная концентрация (35 %) приходится на диапазон 60–90 см. Среднее расстояние до препятствия составило 75 см при стандартном отклонении 20 см, что указывает на необходимость повышенной точности измерений в данном интервале.

Частота столкновений составила 2 раза в 1 ч (1 раз в 1800 с), а вероятность встретить препятствие в произвольный момент – 0,55. Это позволяет корректировать алгоритмы обнаружения и повышать приоритет предупреждений. Например, при приближении к критической дистанции (<30 см) система должна активнее сигнализировать об опасности.

Использование статистических данных позволяет адаптивно калибровать сенсоры, повышать точность измерений и снижать риск столкновений. Внедрение динамической настройки порогов и фильтрации шумов способствует более эффективной навигации и взаимодействию системы с окружающей средой.

Заключение

Разработанная многофункциональная система на базе микроконтроллера Tiva C Series LaunchPad с интеграцией инфракрасных датчиков, камеры, аудиомодуля, радиоканала и генератора частоты прошла цифровое моделирование в MATLAB/Simulink, что позволило выявить узкие места и оптимизировать архитектуру. Разделение конструкции на подсистемы (АЦП, GPIO, UART, SPI, I2C, ИК-сенсоры, камера OV7670, DFPlayer Mini, nRF24L01, Si5351) упростило тестирование и обеспечило предсказуемость результатов. После аппаратной реализации макет системы подтвердил работоспособность решений, включая адаптивную калибровку ИК-датчиков с учетом внешних условий. Линейная модель зависимости расстояния до цели от напряжения

$$D = \frac{a}{V} + b$$

была уточнена методом наименьших квадратов:

$$a = \frac{n \sum V_i D_i - \sum V_i \sum D_i}{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}, \text{ см/В},$$

$$b = \frac{\sum D_i - a \sum V_i}{n}, \text{ см},$$

где n – количество экспериментальных измерений; $\sum V_i D_i$ – сумма произведений напряжений и расстояний; $\sum V_i$ и $\sum D_i$ – суммы всех измеренных напряжений и расстояний; $\sum V_i^2$ – сумма квадратов напряжений.

Влияние изменяющихся факторов, таких как температура и освещенность, компенсировалось поправочным коэффициентом:

$$k_V = \frac{V_{\text{expected}}}{V_{\text{measured}}}, \text{ отн. ед.,}$$

позволяющим корректировать измерения по формулам:

$$V'_i = k_V \cdot V_i,$$

$$V_{\text{expected}} = k_V \cdot V_{\text{measured}}.$$

Экспериментальные данные подтвердили возможность динамической адаптации системы, что открывает перспективы дальнейшего развития, включая интеграцию лидаров, облачных сервисов и алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Jurman D., Jankovec M., Kamnik R., Topic M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007. Vol. 138, iss. 2. P. 411–420. doi: 10.1016/j.sna.2007.05.008
2. Wang J., Lei B., Yang Z., Lei S. A low-cost calibration method for the infrared sensor array for quantitative analysis of natural gas // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022. Vol. 230. doi: 10.1016/j.chemolab.2022.104675
3. Dinh T., Choi I., Son Y., Kim J. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 231. P. 529–538. doi: 10.1016/j.snb.2016.03.040
4. Feudale R. N., Woody N. A., Tan H., Myles A. J., Brown S. D., Ferre J. Transfer of multivariate calibration models: a review // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2002. Vol. 64, iss. 2. P. 181–192. doi: 10.1016/S0169-7439(02)00085-0
5. Fonollosa J., Fernández L., Gutierrez-Galvez A., Huerta R., Marco S. Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 236. P. 1044–1053. doi: 10.1016/j.snb.2016.05.089
6. Mishra P., Passos D. Deep calibration transfer: Transferring deep learning models between infrared spectroscopy instruments // *Infrared Physics & Technology*. 2021. Vol. 117. P. 103863. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103863
7. Li B., Zhao Z., Feng S. Design and Implementation of Remote Measurement and Calibration System for Gas Sensor Based on Internet of Things // In *Proceedings of the 2023 5th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, 2024. P. 818–823. doi: <https://doi.org/10.1145/3653081.3653219>
8. Nagaraja Rao C. R., Zhang N., Sullivan J. T. Inter-calibration of meteorological satellite sensors in the visible and near-infrared // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28, iss. 1. P. 3–10. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00262-9
9. Green R. O., Pavri B., Boardman J. On-orbit calibration of an ocean color sensor with an underflight of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // *Advances in Space Research*. 2001. Vol. 28, iss. 1. P. 133–142. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00322-2
10. Canatan M., Muñoz-Carpena R., Boz Z. Continuous surface temperature monitoring of refrigerated fresh produce through visible and thermal infrared sensor fusion // *Postharvest Biology and Technology*. 2025. Vol. 222. P. 113354. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113354
11. Deev O. I., Debelov V. V., Endachev D. V., Zuev S. M., Shmatkov Yu. M., Shirokov P. S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and

- Spectrum of the Light // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. P. 032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075
12. Wenbo C. Computer vision algorithm based on fiber optic sensors and infrared thermal radiation images for fatigue detection under simulated operating conditions // Thermal Science and Engineering Progress. 2024. Vol. 56. P. 103066. doi: 10.1016/j.tsep.2024.103066

References

1. Jurman D., Jankovec M., Kamnik R., Topic M. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2007;138(2):411–420. doi: 10.1016/j.sna.2007.05.008
2. Wang J., Lei B., Yang Z., Lei S. A low-cost calibration method for the infrared sensor array for quantitative analysis of natural gas. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022;230. doi: 10.1016/j.chemolab.2022.104675
3. Dinh T., Choi I., Son Y., Kim J. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;231:529–538. doi: 10.1016/j.snb.2016.03.040
4. Feudale R.N., Woody N.A., Tan H., Myles A.J., Brown S.D., Ferre J. Transfer of multivariate calibration models: a review. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2002;64(2):181–192. doi: 10.1016/S0169-7439(02)00085-0
5. Fonollosa J., Fernández L., Gutierrez-Galvez A., Huerta R., Marco S. Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016;236:1044–1053. doi: 10.1016/j.snb.2016.05.089
6. Mishra P., Passos D. Deep calibration transfer: Transferring deep learning models between infrared spectroscopy instruments. *Infrared Physics & Technology*. 2021;117:103863. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103863
7. Li B., Zhao Z., Feng S. Design and Implementation of Remote Measurement and Calibration System for Gas Sensor Based on Internet of Things. In *Proceedings of the 2023 5th International Conference on Internet of Things, Automation and Artificial Intelligence (IoTAAI '23)*. Association for Computing Machinery, New York, 2024:818–823. doi: <https://doi.org/10.1145/3653081.3653219>
8. Nagaraja Rao C.R., Zhang N., Sullivan J.T. Inter-calibration of meteorological satellite sensors in the visible and near-infrared. *Advances in Space Research*. 2001;28(1):3–10. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00262-9
9. Green R.O., Pavri B., Boardman J. On-orbit calibration of an ocean color sensor with an underflight of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Advances in Space Research*. 2001;28(1):133–142. doi: 10.1016/S0273-1177(01)00322-2
10. Canatan M., Muñoz-Carpena R., Boz Z. Continuous surface temperature monitoring of refrigerated fresh produce through visible and thermal infrared sensor fusion. *Postharvest Biology and Technology*. 2025;222:113354. doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.113354
11. Deev O.I., Debelov V.V., Endachev D.V., Zuev S.M., Shmatkov Yu.M., Shirokov P.S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and Spectrum of the Light. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666:032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075
12. Wenbo C. Computer vision algorithm based on fiber optic sensors and infrared thermal radiation images for fatigue detection under simulated operating conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024;56:103066. doi: 10.1016/j.tsep.2024.103066

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Зуев

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78); начальник управления подготовки кадров высшей квалификации и ДПО, Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, 2)

E-mail: sergei_zuev@mail.ru

Sergey M. Zuev

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of optical-electronic devices and systems, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia); head of the department for training of highly qualified personnel and additional professional education, The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMI” (2 Avtomotornaya street, Moscow, Russia)

Иван Юрьевич Константинов

студент, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: indavanes@yandex.ru

Ivan Yu. Konstantinov

Student, MIREA - Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 04.05.2025

Принята к публикации / Accepted 28.05.2025