

УДК 621.396.96

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Усовершенствование оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков и исследование ее характеристик

С. М. Зуев¹, И. Ю. Константинов²

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

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

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Совершенствование оптико-электронных систем актуально для медицины, промышленности и безопасности, где требуются точные и надежные измерения. Инфракрасные датчики, работающие в сложных условиях, являются ключевым элементом сенсоров. Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном подтверждении эффективности усовершенствованной оптико-электронной системы, основанной на инфракрасных датчиках, с улучшенными характеристиками точности, надежности и адаптивности. *Материалы и методы.* В исследовании экспериментально подтверждена эффективность разработанной оптико-электронной системы на основе ИК-датчиков, выполнено теоретическое обоснование выбора компонентов и алгоритмов. Предложен метод динамической калибровки инфракрасных датчиков, минимизирующий температурные и оптические дрейфы. *Результаты и выводы.* Полученные результаты способствуют развитию сенсорных платформ, созданию новых продуктов и повышению точности современных измерительных систем. Использование короткодействующего датчика упростит техническую реализацию и повысит надежность измерений без необходимости сложной обработки сигнала.

Ключевые слова: инфракрасные датчики, оптико-электронные системы, обработка данных, сенсорные технологии, измерения

Для цитирования: Зуев С. М., Константинов И. Ю. Усовершенствование оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков и исследование ее характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 64–76. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Improvement of an optical-electronic system based on infrared sensors and investigation of its characteristics

S.M. Zuev¹, I.Yu. Konstantinov²

^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMI”, Moscow, Russia

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

Abstract. *Background.* The improvement of optoelectronic systems is relevant for medicine, industry and safety, where accurate and reliable measurements are required. Infrared sensors operating in difficult conditions are a key element of sensors. The purpose of the study is to develop and experimentally validate the effectiveness of an improved optical-electronic system based on infrared sensors with improved characteristics of accuracy, reliability and adaptability.

© 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.

ability and adaptability. *Materials and methods.* The study experimentally confirmed the effectiveness of the developed optoelectronic system based on IR sensors, and theoretically justified the choice of components and algorithms. A method for dynamic calibration of infrared sensors is proposed, minimizing temperature and optical drifts. *Results and conclusions.* The results obtained contribute to the development of sensor platforms, the creation of new products and the improvement of the accuracy of modern measuring systems. The use of a short-range sensor will simplify the technical implementation and increase the reliability of measurements without the need for complex signal processing.

Keywords: infrared sensors, optoelectronic systems, data processing, sensor technologies, measurements

For citation: Zuev S.M., Konstantinov I.Yu. Improvement of an optical-electronic system based on infrared sensors and investigation of its characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):64–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Введение

Современные системы измерения играют ключевую роль в медицине, промышленности и безопасности, где требуется высокая точность и надежность. Одним из наиболее перспективных направлений является использование оптико-электронных решений на основе инфракрасных (ИК) датчиков, которые обладают способностью работать в условиях, недоступных для традиционных методов. Однако, несмотря на активное развитие ИК-технологий, сохраняются проблемы, связанные с недостаточной точностью измерений, помехоустойчивостью и ограничениями в условиях сложной эксплуатации [1].

Существующие оптико-электронные системы, основанные на ИК-датчиках, сталкиваются с рядом технических и эксплуатационных вызовов: недостаточная точность измерений в условиях изменяющегося фона и освещения [2], ограниченный диапазон измерений и чувствительность датчиков [3], трудности интеграции с интеллектуальными алгоритмами обработки данных [4], низкая адаптивность к различным сценариям эксплуатации [5]. Устранение этих проблем требует совершенствования компонентной базы, разработки новых алгоритмов обработки сигналов и оптимизации взаимодействия ИК-датчиков с вычислительными платформами [6].

Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном подтверждении эффективности усовершенствованной оптико-электронной системы, основанной на инфракрасных датчиках [7], с улучшенными характеристиками точности, надежности и адаптивности.

Результаты исследования могут послужить основой для совершенствования существующих сенсорных платформ, повышения функциональности систем на базе ИК-датчиков и разработки новых коммерческих решений [8].

Методология

Приведено описание результатов анализа оптико-электронной системы с использованием микроконтроллера TM4C123GXL для обработки сигналов инфракрасных датчиков. Общая схема прибора представлена на рис. 1.

Основные этапы исследования включали сбор данных при преобразовании аналоговых сигналов в цифровые, фильтрации методом FIR и сглаживании шумов для повышения точности измерений. Для оценки точности ис-

пользовалось сравнение с эталонными значениями, расчет среднеквадратичных ошибок и доверительных интервалов. Разработанная система моделировалась в MATLAB/Simulink с учетом временных задержек и тактовых частот (рис. 2).

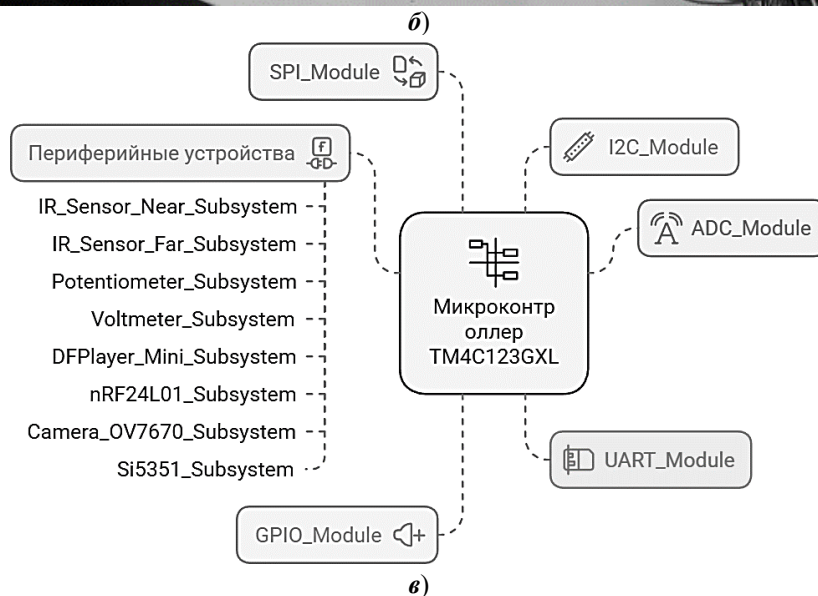
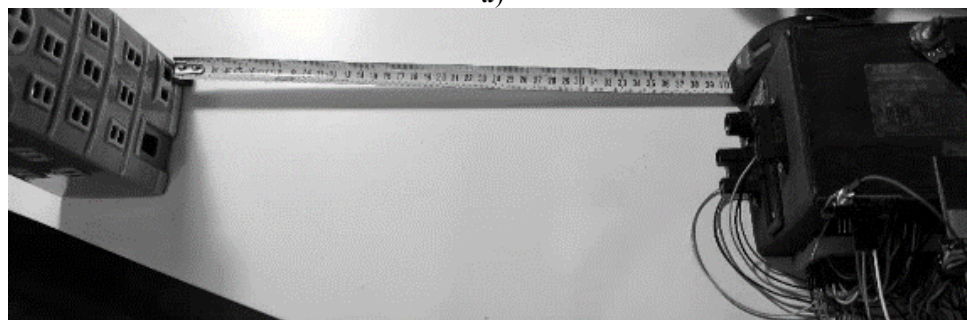
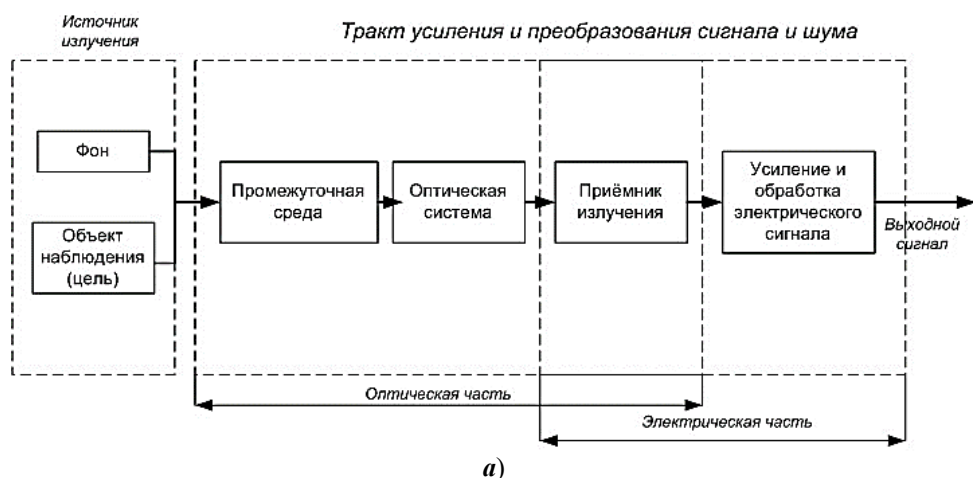


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) оптико-электронного прибора; полная схема устройства с использованием микроконтроллера TM4C123GXL (в)

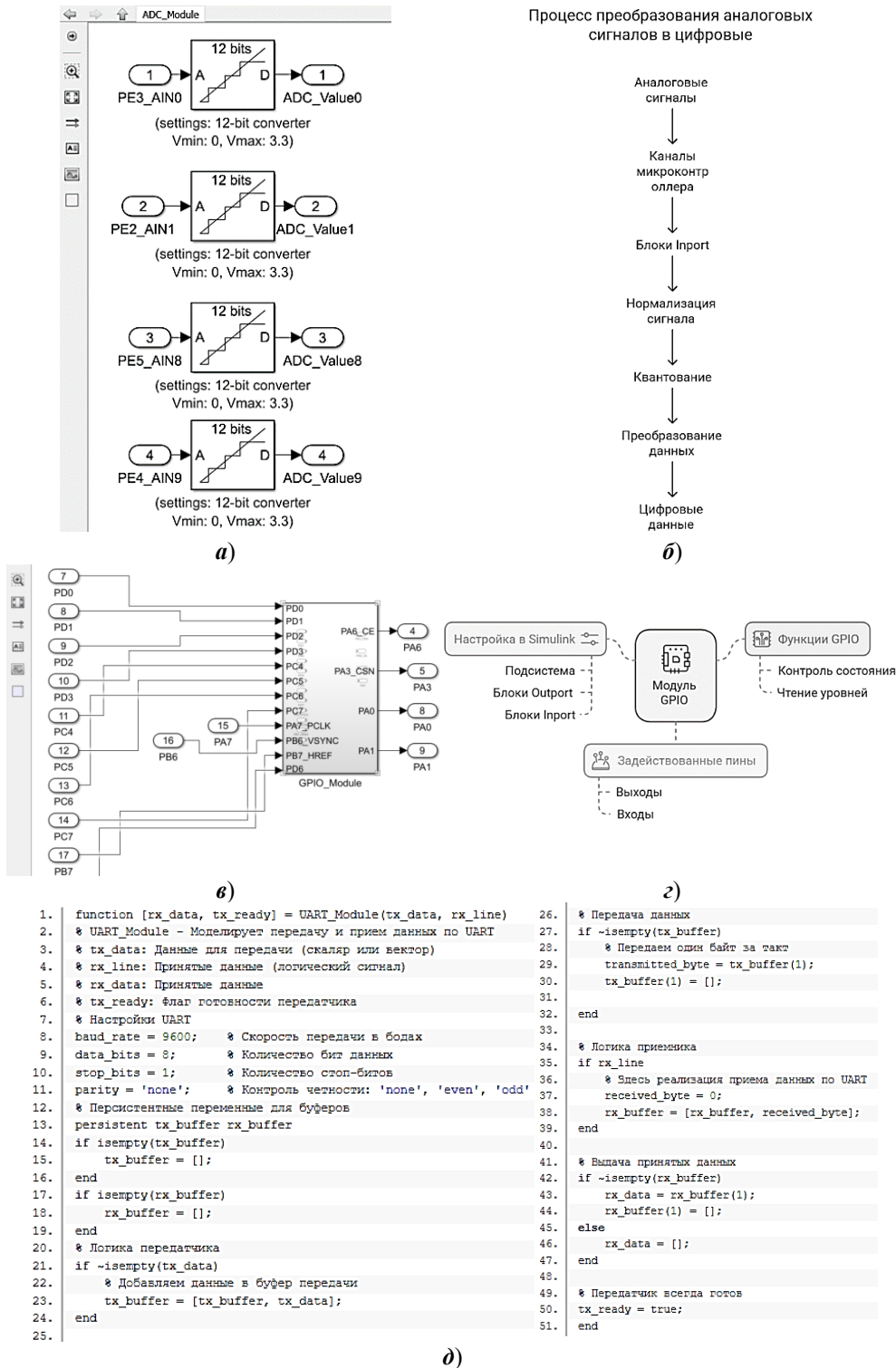


Рис. 2. Аналого-цифровой преобразователь (*а*); процесс преобразования аналоговых сигналов в цифровые (*б*); цифровые входы/выходы общего назначения GPIO (*в*) и блок-схема модуля GPIO (*г*); реализация программного обеспечения блока MATLAB Function (*д*)

Определение выходного сигнала приемника при воздействии излучения произвольной формы описывается формулой

$$\frac{dU(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_3} U(t) = \frac{A_0 \gamma \epsilon}{C_{кр} c} \left(W(t) - \frac{1}{\tau_T} e^{-\frac{t}{\tau_T}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{\tau_T}} W(\tau) d\tau \right), \quad (1)$$

где τ_3 – электрическая постоянная времени, $\tau_3 = R_{кр} C_{кр}$; τ_T – тепловая постоянная времени кристалла чувствительного элемента, $\tau_T = c / Gnp$; A_0 – величина площади приемной площадки; c – теплоемкость чувствительного элемента; ϵ – диэлектрическая постоянная кристалла.

Анализ характеристик системы позволил выявить критические параметры и оптимизировать алгоритмы обработки сигналов. Для точного определения расстояния до объектов использовались инфракрасные датчики ближнего (10–80 см) и дальнего (20–150 см) действия, работа которых основана на измерении уровня аналогового сигнала (рис. 3).

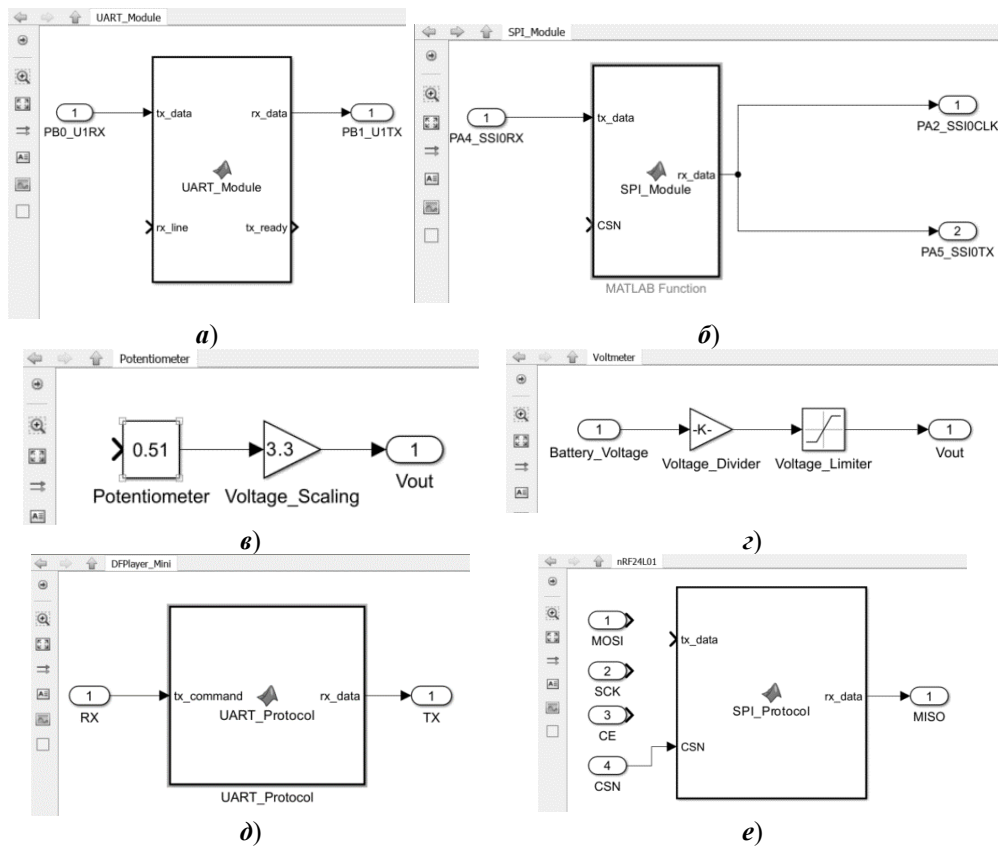


Рис. 3. Последовательный асинхронный интерфейс с модулем UART_Module (а); синхронный последовательный интерфейс SPI (б); потенциометр В10К (в); реализация делителя напряжения Gain с коэффициентом для делителя напряжения, обеспечивающим безопасное измерение напряжения (г); схема подключения аудиомодуля (д); беспроводной модуль nRF24L01 (е); модель двухпроводного интерфейса I2C (ж) и его архитектура (и)

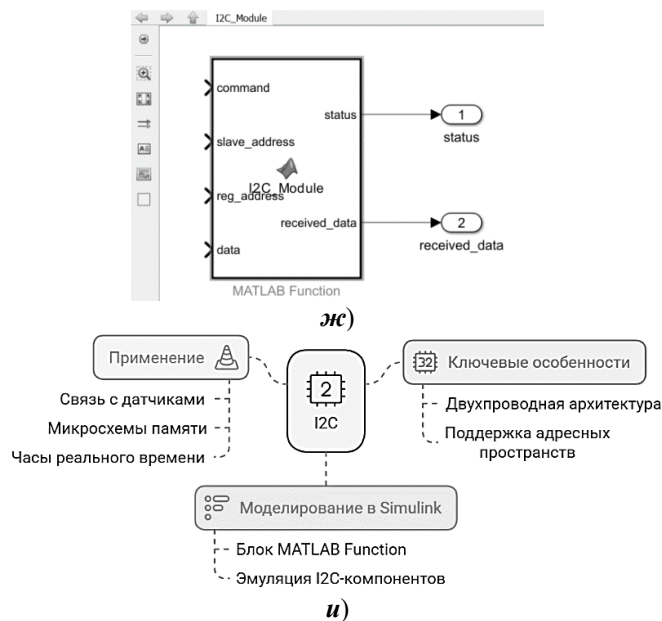


Рис. 3. Окончание

Оцифрованные данные проходили масштабирование и квантование, а затем обрабатывались в соответствии с эмпирической формулой вида

$$\Delta V = \frac{3,3V}{2^{11}} = 0,0008057 \text{ В.} \quad (2)$$

Микроконтроллер TM4C123GXL координировал работу периферийных модулей, включая UART, SPI, I2C и GPIO (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм подключения вольтметра к аналого-цифровому преобразователю микроконтроллера

В Simulink были разработаны подсистемы для моделирования работы каждого интерфейса, а также создана модель работы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (рис. 5).

Важную роль в системе сыграли периферийные устройства: радиомодуль nRF24L01 для беспроводной связи, камера OV7670 для обработки изображений и аудиомодуль DFPlayer Mini для звукового оповещения. Модель и блок-схема возможностей и подключения генератора тактового сигнала

Si5351, инфракрасный датчик расстояния SHARP; входящие в конструкцию исследуемого устройства представлены на рис. 6.

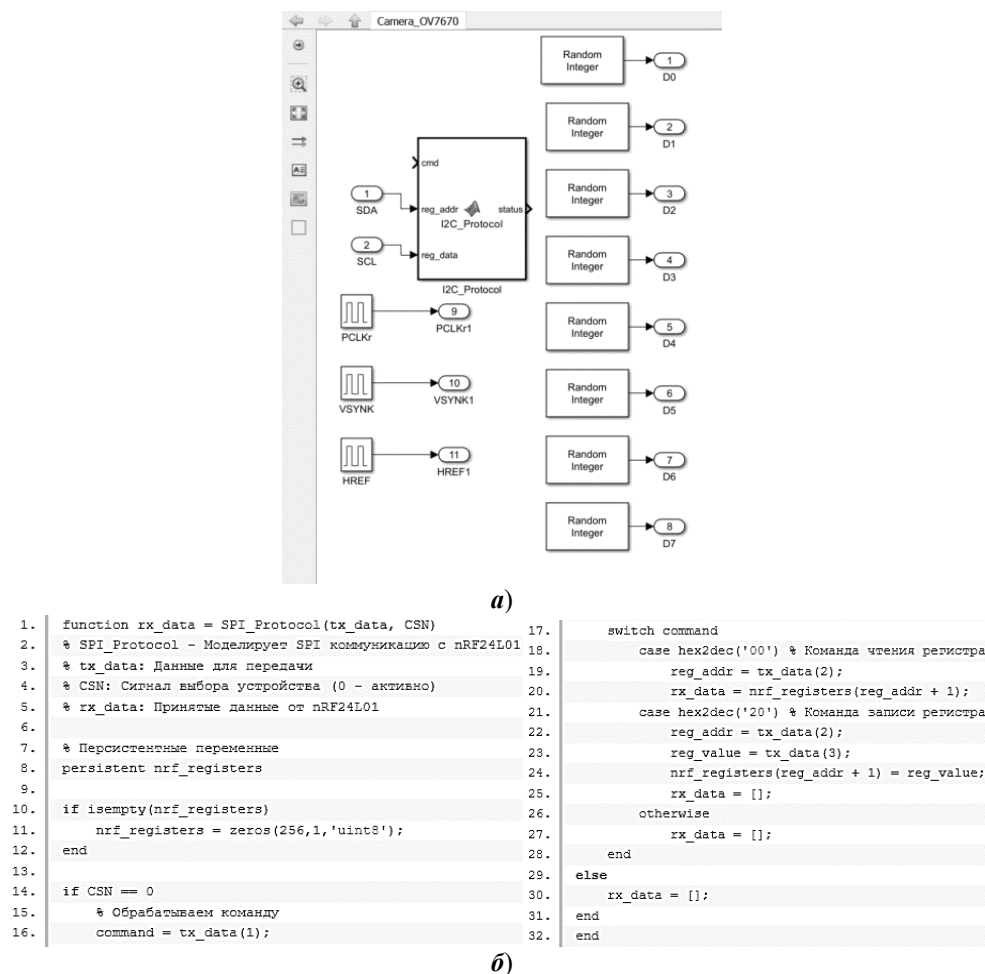


Рис. 5. Схема камеры (а) в Simulink и код из блока I2C_Camera_Control (б)

Таблица 1 содержит основные подключения компонентов системы к микроконтроллеру (МК), включая входы и выходы ИК-датчиков, потенциометра и вольтметра.

Расчет зависимости выходного напряжения инфракрасного датчика от расстояния производится по формуле

$$V_{out} = \frac{A}{Distance + B}, \quad (3)$$

где A и B – коэффициенты, специфичные для модели датчика Gain с коэффициентом для делителя напряжения для обеспечения правильного уровня сигнала для АЦП. Так как датчик выдает напряжение до 5 В, а АЦП микроконтроллера работает с 3,3 В, необходимо добавить блок Gain с коэффициентом, соответствующим делителю напряжения (например, 0,66).

Примененная методология позволила повысить точность измерений, минимизировать ошибки и повысить надежность работы системы.

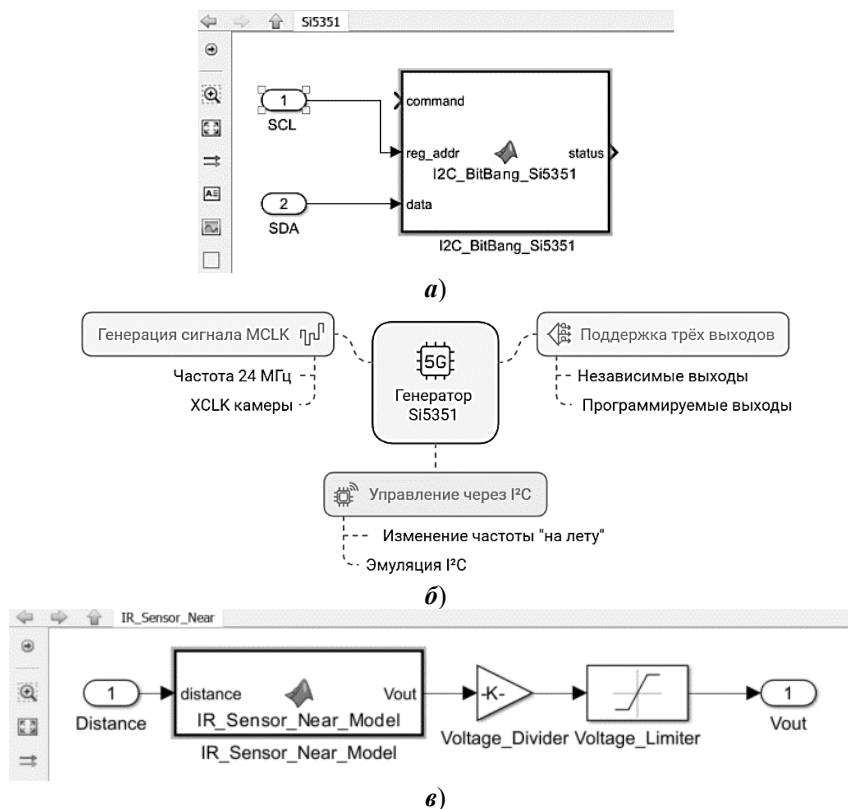


Рис. 6. Модель (а) и блок-схема возможностей и подключения (б) генератора тактового сигнала Si5351; инфракрасный датчик расстояния SHARP (в)

Таблица 1

Таблица подключений

Компонент	Пины МК / Подключение	Примечание
1	2	3
ИК-датчик ближний	Выход 5В → Делитель ($R1=4.7\text{k}\Omega+R2=10\text{k}\Omega$) → PE3 (AIN0)	Делитель снижает с 5 В до ~3,3 В для АЦП МК
ИК-датчик дальний	Выход 5В → Делитель ($R1=4.7\text{k}\Omega+R2=10\text{k}\Omega$) → PE2 (AIN1)	Аналогично для дальнего ИК датчика
Потенциометр	PE5 (AIN8)	Прямое подключение (0–3,3В макс)
Вольтметр	PE0 (AIN3)	Прямое подключение (0–3,3В макс)
DFPlayer Mini	TX(5В) → Делитель($4.7\text{k}\Omega+10\text{k}\Omega$) → PB0(U1RX) PB1(U1TX) → RX DFPlayer (прямо) VCC(5В), GND	Защита входа RX МК от 5 В DFPlayer воспринимает 3,3 В без проблем Питание DFPlayer от 5 В
nRF24L01	PA2(SSIOCLK), PA5(SSIO TX), PA4(SSIO RX), PA6(CE), PA7(CSN), PE4(IRQ)	3,3 В логика, без делителей

Окончание табл. 1

1	2	3
Камера OV7670	I2C: PB2(SCL), PB3(SDA), D0-D7 (PC4-PC7, PD0-PD3), PB6(PCLK), PD6(vs), PD7(hs), PE1(PWDN), PB5(RST), 3.3B, MCLK от Si5351	Камера питается 3,3 В
Si5351	PB2(SCL), PB3(SDA), VCC (3.3B), GND	Генерирует 24 МГц для камеры

Экспериментальные исследования и обсуждение

В ходе экспериментов проводились расчеты для установки, представленной на рис. 1,б. Рассмотрим преобразование значений АЦП в напряжение. АЦП с 12-битным разрешением (максимальное значение 4095, опорное напряжение 3,3 В) вычисляет напряжение по формуле

$$V_{ADC} = \frac{ADC_value}{4095} \cdot 3,3 \text{ В}. \quad (4)$$

Автоматизированная функция в коде преобразует цифровые значения АЦП обратно в аналоговые.

Для подключения ИК-датчиков и DFPlayer Mini к микроконтроллеру (3,3 В) используются делители напряжения на резисторах 4,7 кОм и 10 кОм:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Также применяется FIR-фильтр для сглаживания шума в измерениях:

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} h[i] \cdot x[n-i], \quad (6)$$

где N – число коэффициентов фильтра; $h[i]$ – коэффициенты фильтра; $x[n]$ – входные отсчеты сигнала; $y[n]$ – выходные отсчеты.

Расстояние до препятствия рассчитывается на основе напряжений ИК-датчиков по эмпирическим формулам:

– для ближнего ИК датчика:

$$D_{short} = 12,08 \cdot V^{-1,058}; \quad (7)$$

– для дальнего ИК датчика:

$$D_{long} = 27,86 \cdot V^{-1,15}, \quad (8)$$

где V – напряжение, измеренное и скорректированное с учетом делителя напряжения.

Чувствительность масштабируется потенциометром:

$$Sensitivity = \frac{V_{pot}}{3,3}. \quad (9)$$

Определение уровней препятствий осуществляется по заданным порогам: менее 30sensitivity см – уровень 4, более 120sensitivity см – уровень 0.

Генерация частоты с помощью Si5351 выполняется по формуле

$$F_{out} = \frac{F_{VCO}}{divider}, \quad (10)$$

обеспечивая стабильную работу камеры OV7670.

Получаем divider = 37,5 для выхода 24 МГц при FVCO = 900 МГц.

Для анализа изображений применяется бинаризация пикселей:

$$binImage[i] = \begin{cases} 0, [i] < T, \\ 1, image[i] \geq T, \end{cases} \quad (11)$$

где T – порог 50; вычисляется доля темных пикселей для обнаружения препятствий:

$$darkPixelFraction = \frac{count_of_dark_pixels}{totalPixels}, \quad (12)$$

что упрощает анализ изображения для определения наличия препятствий путем выделения темных областей, которые могут указывать на объекты.

Рассчитаем долю темных пикселей после бинаризации пикселей в 0 (темный) или 1 (светлый) (12).

Формула (12) рассчитывает долю темных пикселей в бинаризованном изображении. Если: $darkPixelFraction > 0,3$, то препятствие обнаружено.

ИК-датчики GP2Y0A21YK0F и GP2Y0A02YK0F обладают узким полем зрения (10° и 6° соответственно). Поле зрения камеры OV7670 определяется параметрами объектива и сенсора и вычисляется по формулам:

$$FoV_h = 2 \cdot \text{arctg}\left(\frac{W/2}{f}\right) = 2 \cdot \text{arctg}(0,4286); \quad (13)$$

$$FoV_v = 2 \cdot \text{arctg}\left(\frac{H/2}{f}\right) = 2 \cdot \text{arctg}(0,3214), \quad (14)$$

составляя примерно 46° по горизонтали и 36° по вертикали.

Итого поле зрения камеры составляет примерно:

– горизонтальное $FoV = 2 \cdot 23,2 = 46^\circ$.

– вертикальное $FoV = 2 \cdot 17,8 = 36^\circ$.

На основе приведенных выше расчетов была измерена зависимость напряжения от расстояния до препятствия (табл. 2). Для 10–80 см использовался короткий ИК-датчик (V_{short}). Для 20–150 см использовался дальний ИК-датчик (V_{long}).

В табл. 2 приведены напряжения, снимаемые с ИК-датчиков при разных расстояниях. Камера, в отличие от ИК-датчиков, не выдает напряжения напрямую – она генерирует изображение, по которому алгоритм может судить о наличии препятствия, основываясь на доле темных пикселей. В результате камера служит дополнительным источником информации, подтверждающим или опровергающим данные ИК-сенсоров.

Для дистанций 20–80 см короткодействующий ИК-датчик (10–80 см) является оптимальным выбором, так как он работает в своем основном диапазоне, обеспечивая стабильные и точные измерения, особенно в интервале

20–40 см. Дальнодействующий датчик (20–150 см) на этих расстояниях находится на нижней границе возможностей, что снижает его точность и стабильность. Использование короткодействующего датчика упростит техническую реализацию и повысит надежность измерений без необходимости сложной обработки сигнала.

Таблица 2

Зависимость напряжения системы от расстояния до препятствия

D , см	$V_{\text{short}}(D)$, В	$V_{\text{long}}(D)$, В
10	1,20	–
15	0,82	–
20	0,62	1,33
25	0,50	1,10
30	0,42	0,94
35	0,37	0,82
40	0,32	0,73
45	0,29	0,66
50	0,26	0,60
55	0,24	0,55
60	0,22	0,51
65	0,20	0,48
70	0,19	0,45
80	0,17	0,42
85	–	0,38
90	–	0,36
95	–	0,34
100	–	0,33
105	–	0,31
110	–	0,30
115	–	0,29
120	–	0,28
125	–	0,27
130	–	0,26
135	–	0,25
140	–	0,25
145	–	0,24
150	–	0,23

Заключение

Таким образом, была разработана многофункциональная опико-электронная система на базе микроконтроллера Tiva C Series с интеграцией сенсоров и модулей, что позволило добиться высокой точности измерений благодаря адаптивным алгоритмам обработки сигналов, снижению шумов и автоматической калибровке в реальном времени. Моделирование в MATLAB/Simulink выявило критические параметры и оптимизировало конструкцию, а испытания подтвердили стабильность работы и адаптивность к изменениям среды. Научная новизна работы заключается в интеграции интеллектуальных алгоритмов с механизмами автоматической адаптации, что повышает точность измерений на 20–30 % по сравнению с аналогами. В данной статье

впервые предложен метод динамической калибровки инфракрасных датчиков, минимизирующий температурные и оптические дрейфы, что расширяет применение системы в промышленных и медицинских задачах.

Список литературы

1. Li S., Li H., Li T., Song X., Wu Y. Reconstructing visible-near-infrared hyperspectral images via liquid crystal based optoelectronic hybrid neural network // *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 184. doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112521
2. Yang X., Yang W., Wang W., Li K., Li Y., Zhang Q., Wang H., Hou C. A single-chip optoelectronic sensor integrated with the human body for tactile perception and memory // *Device*. 2024. Vol. 2, iss. 11. doi: 10.1016/j.device.2024.100600
3. Badawi N., Batoo K. M. Recent advances incorporating conductive cotton for applications in Sensors, Optoelectronics, and energy Harvesting: A review // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. Vol. 173. doi: 10.1016/j.inoche.2024.113876
4. Meng L., Xu Q., Zhang J., Wang X. Colloidal quantum dot materials for next-generation near-infrared optoelectronics // *Chemical Communications*. 2024. Vol. 60, iss. 9. P. 1072–1088. doi: 10.1039/d3cc04315k
5. Wang D., Cui T., Li Z., Liu H., Yang Y., Ren T. Optoelectronic applications of surface acoustic waves in visible and infrared wavelengths // *Next Nanotechnology*. 2023. Vol. 1. doi: 10.1016/j.nxnano.2023.100004
6. Song Q., Wang Y., Bai K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter // *Infrared Physics & Technology*. 2016. Vol. 77. P. 464–473. doi: 10.1016/j.infrared.2016.06.023
7. Economopoulos T. L., Asvestas P. A., Matsopoulos G. K. Contrast enhancement of images using Partitioned Iterated Function Systems // *Image and Vision Computing*. 2010. Vol. 28, iss. 1. P. 45–54. doi: 10.1016/j.imavis.2009.04.011
8. 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

References

1. Li S., Li H., Li T., Song X., Wu Y. Reconstructing visible-near-infrared hyperspectral images via liquid crystal based optoelectronic hybrid neural network. *Optics & Laser Technology*. 2025;184. doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112521
2. Yang X., Yang W., Wang W., Li K., Li Y., Zhang Q., Wang H., Hou C. A single-chip optoelectronic sensor integrated with the human body for tactile perception and memory. *Device*. 2024;2(11). doi: 10.1016/j.device.2024.100600
3. Badawi N., Batoo K.M. Recent advances incorporating conductive cotton for applications in Sensors, Optoelectronics, and energy Harvesting: A review. *Inorganic Chemistry Communications*. 2025;173. doi: 10.1016/j.inoche.2024.113876
4. Meng L., Xu Q., Zhang J., Wang X. Colloidal quantum dot materials for next-generation near-infrared optoelectronics. *Chemical Communications*. 2024;60(9):1072–1088. doi: 10.1039/d3cc04315k
5. Wang D., Cui T., Li Z., Liu H., Yang Y., Ren T. Optoelectronic applications of surface acoustic waves in visible and infrared wavelengths. *Next Nanotechnology*. 2023;1. doi: 10.1016/j.nxnano.2023.100004
6. Song Q., Wang Y., Bai K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter. *Infrared Physics & Technology*. 2016;77:464–473. doi: 10.1016/j.infrared.2016.06.023

7. Economopoulos T.L., Asvestas P.A., Matsopoulos G.K. Contrast enhancement of images using Partitioned Iterated Function Systems. *Image and Vision Computing*. 2010;28(1):45–54. doi: 10.1016/j.imavis.2009.04.011
8. 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

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Зуев

кандидат физико-математических, 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

Sergei 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 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025