

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 004.7

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПРЕПЯТСТВИЯ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМОЙ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОМОЩЬЮ ИК-ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ ТИПА GP2Y0A (SHARP)

Андреев В.П.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Россия
andreevipa@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* При организации движения мобильного робота (МР) в недетерминированной среде возникает задача SLAM, которая включает обнаружение сенсорной системой МР наличия препятствия, расстояния до него и формы препятствия. Для решения данной задачи часто используется инфракрасный (ИК) аналоговый датчик расстояния, информационный поток от которого относительно невелик и может быть обработан в реальном времени с помощью микроконтроллеров невысокой производительности. Однако такой датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить расстояние до некоторой точки его поверхности. Цель – разработать метод определения как расстояния до препятствия, так и его форму. При использовании аналогового датчика типа GP2Y0A (SHARP) выявилась проблема, связанная с возникновением со случайной периодичностью в коммуникационном канале передачи данных аномальных значений сигнала – артефактов. Необходимо выявить источник таких помех, предложить метод оценки их параметров и способ минимизации влияния. *МЕТОДЫ.* Для определения формы препятствия предлагается дифференциальный метод, основанный на использовании нескольких отсчётов сканирующего ИК-датчика расстояния. В качестве показателя «за шумлѐнности» канала предлагается использовать количество значений сигнала датчика, превышающих величину среднего значения сигнала на 1σ , 2σ , 3σ , 4σ и 5σ . Применение статистических методов фильтрации шума приводит к существенным задержкам реакции системы управления МР. Это недопустимо, поскольку на исполнительном уровне системы управления требуется обеспечить режим «жѐсткого» реального времени. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье приведены результаты экспериментов, показывающие условия применения дифференциального метода, выявлен источник аномальных значений сигнала и предложен способ их минимизации. Предложен метод увеличения диапазона практического использования нелинейной функции преобразования ИК-датчика. *ВЫВОДЫ.* Количество и величина аномальных значений зависят от длины коммуникационного канала. При использовании аналоговых датчиков следует преобразовывать выходной сигнал в цифровую форму, применяя для этого аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в интегральном исполнении, максимально приближая АЦП к источнику сигнала.

Ключевые слова: мобильный робот; система управления; аналоговый датчик; коммуникационный канал; флуктуационный шум; фильтрация шума.

Благодарности: Работа, по результатам которой подготовлена статья, является инициативной и выполнена при участии сотрудников Центра технологической поддержки образования Международного института новых образовательных технологий РГТУ.

Для цитирования: Андреев В.П. Определение формы препятствия сенсорной системой мобильного робота с помощью ИК-датчиков расстояния типа GP2Y0A (Sharp) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 195-207. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207.

**OBSTACLE SHAPE DETERMINATION BY MOBILE ROBOT SENSOR SYSTEM
USING GP2Y0A (SHARP) TYPE IR DISTANCE SENSORS**

Andreev VP.

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
andreevipa@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* When organizing a mobile robot (MR) movement in a non-deterministic environment, the SLAM problem arises, which includes the detection of an obstacle presence by the MR sensor system, the distance to the obstacle and its shape. To solve this problem, an infrared (IR) analog distance sensor is often used, the information flow from which is relatively small and can be processed in real time using low-performance microcontrollers. However, such a sensor can only detect an obstacle and determine a distance to a certain point on its surface. The goal is to develop a method for determining both a distance to an obstacle and its shape. When setting up experiments on the use of an analog sensor of the GP2Y0A (SHARP) type, a problem was revealed associated with the occurrence of not only fluctuation noise in a data communication channel, but also artifacts – anomalous signal values appear with random periodicity. It is necessary to determine the source of such interference, propose a method for estimating its parameters and a way to minimize its influence. *METHODS.* To determine the shape of an obstacle, a differential method is proposed based on the use of several readings of a scanning IR distance sensor. As an indicator of the “noisiness” of the channel, it is proposed to use the number of sensor signal values that exceed the average signal value by 1σ , 2σ , 3σ , 4σ and 5σ . The use of standard methods for filtering abnormal values of a sensor signal leads to significant delays in a response of the MR control system. This is unacceptable, because at the executive level of a control system it is required to provide a “hard” real-time mode. *RESULTS.* The article presents the results of experiments showing the conditions for applying the differential method for determining a shape of an obstacle, the source of anomalous signal values is identified and a method for minimizing them is proposed. A method for increasing the practical use range of a nonlinear IR sensor conversion function is also proposed. *CONCLUSION.* The number and magnitude of abnormal values depend on a communication channel length. When using analog sensors, it is necessary to convert an output signal into digital form using analog-to-digital converters (ADCs) in an integrated design, structurally bringing the ADC as close as possible to the signal source.

Keywords: mobile robotics; control system; analog sensor; communication channel; fluctuation noise; noise filtering.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was prepared, is proactive and was carried out with the participation of employees of the Center for Technological Support of Education of the International Institute of New Educational Technologies of the Russian State University for the Humanities.

For citation: Andreev VP. Obstacle shape determination by mobile robot sensor system using GP2Y0A (Sharp) type ir distance sensors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 195-207. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207.

Введение (Introduction)

При организации движения мобильного робота (МР) в недетерминированной среде возникает задача SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) [1, 2], при решении которой обычно используются такие дистанционные датчики, как лидары, телекамеры, тепловизоры. Однако, для обработки их выходных сигналов в режиме «жёсткого» реального времени требуется иметь на борту МР мощные вычислительные средства, что приводит к высокому энергопотреблению и увеличению массогабаритных характеристик мобильной части робототехнического комплекса. Это, в свою очередь, снижает время автономной работы МР. Одной из основных составляющих SLAM является задача обнаружения в процессе движения сенсорной системой МР препятствия, определения расстояния до него и его формы [3]. Для решения данной задачи часто используется инфракрасный (ИК) датчик расстояния типа GP2Y0A (SHARP) [4], информационный поток

от которого невелик и относительно легко может быть обработан в реальном времени с помощью микроконтроллеров невысокой производительности – встраиваемых вычислительных устройств [5]. Однако этот датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить расстояние до некоторой точки его поверхности. **Цель исследования** заключается в разработке метода определения как расстояния до препятствия, так и его формы по данным, получаемым с помощью аналогового ИК-датчика расстояния. При постановке экспериментов по использованию в сенсорной системе МР аналогового датчика типа GP2Y0A (SHARP) выявился ряд проблем, связанных с возникновением не имеющих статистической закономерности помех в коммуникационном канале при передаче аналоговых сигналов в блок обработки системы управления МР [6, 7]. Такие помехи, выражающиеся в появлении со случайной периодичностью аномальных значений сигнала, обычно называют артефактами. Такие искажения сигнала датчиков расстояния критичны при организации движения МР в недетерминированной среде – неверное определение расстояния до препятствия или его формы могут привести к столкновению робота с объектами среды. В статье [8] перечислено 5 проблем с функционированием аналоговых каналов, в том числе влияние электромагнитных полей. Один из наиболее эффективных способов защиты от влияния электромагнитных полей – это использование соответствующего экранирования с заземлением [9]. Однако, такой способ в конструктиве мобильного робота реализовать сложно, например, при использовании колёсной транспортной платформы с обрешиненными колёсами. **Научная значимость исследования** состоит в предложении метода оценки параметров аномальных значений сигнала, возникающих в аналоговых каналах передачи данных. **Практическая значимость исследования** заключается в выявлении источника таких помех в сенсорной системе МР и предложении способа их минимизации, что позволит использовать дешёвые аналоговые ИК-датчики расстояния, например, типа GP2Y0A (SHARP), для определения расстояния до препятствия и его формы.

Принцип работы ИК-датчика расстояния GP2Y0A фирмы SHARP

Инфракрасные датчики расстояния широко применяются в мобильной робототехнике для обнаружения препятствий на пути движения мобильного робота (МР). Датчики типа GP2Y0A фирмы SHARP (рис. 1) относятся к классу генераторных аналоговых дистанционных датчиков – датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины в аналоговый электрический сигнал [10].



Рис. 1. Датчик типа GP2Y0A (SHARP)

Fig. 1. GP2Y0A (SHARP) type sensor

*Источник: [11] Source: [11].

Для определения расстояния до объекта используется метод триангуляции (рис. 2) [11]. Излучателем LED формируются световые импульсы ИК-диапазона, модулированные определённой частотой. Излучение проходит через линзу L1 и отражается от объектов P1 или P2, находящихся в поле зрения сенсора. Отражённый луч света собирается линзой L2 и передаётся на позиционно-чувствительный фотоэлемент PSD, который поделён на две равные части U1 и U2. Испускаемый и отражённый лучи образуют треугольник «излучатель-объект-приёмник». Угол отражения зависит от расстояния l ($l_1 \div l_2$) до объекта.

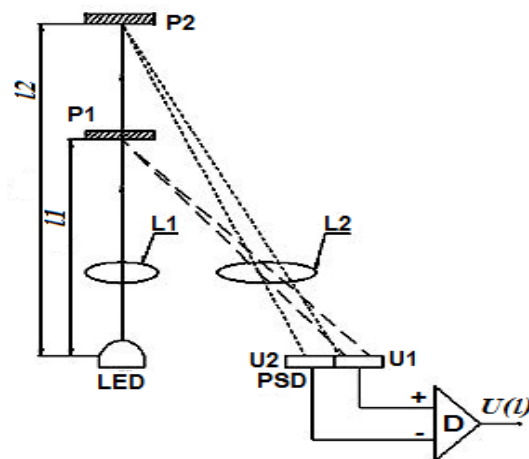


Рис. 2. Метод триангуляции

Fig. 2. Triangulation method

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Отражённый от объектов P1 и P2 луч на поверхности PSD образует световое пятно (вследствие диффузии). Когда световое пятно находится в центральной части, сегменты обеих частей фотозлемента будут освещены одинаково. В положении объекта P1 отражённый свет будет падать на часть U1 фотозлемента PSD, в положении P2 – на часть U2. Смещение светового пятна приводит к большей доле освещённости одного сегмента PSD по сравнению с другим. В результате на выходе дифференциального усилителя D возникает аналоговый электрический сигнал $U(l)$, пропорциональный углу отклонения светового пятна от центральной части фотозлемента. Величина угла, в свою очередь, зависит от расстояния до объекта в пределах диапазона $l1 \div l2$. Для исключения влияния на показания стороннего излучения датчик работает в зоне ближнего ИК излучения – $850\text{nm} \pm 70\text{nm}$, дополнительно используется модуляция с фиксированной частотой импульсного ИК-излучения с соответствующей фильтрацией полосовым фильтром на приёмной стороне.

В зависимости от диапазона измеряемой дальности выпускаются 4 типа датчиков: GP2Y0A41SK0F – $4 \div 30\text{cm}$, GP2Y0A21YK0F – $10 \div 80\text{cm}$, GP2Y0A02YK0F – $20 \div 150\text{cm}$ и GP2Y0A710K0F – $100 \div 550\text{cm}$. Модель датчика GP2Y0A02YK0F имеет цифровой выходной сигнал, в отличие от остальных датчиков, и соответственно обладает несколько большими габаритами. Сенсор способен определять изменение смещения объекта с точностью до 1mkm (при определённых условиях).

На рис. 3 приведена типовая зависимость выходного напряжения датчика GP2Y0A21YK0F от расстояния до объекта [12]. Датчики имеют два основных недостатка: неоднозначная зависимость выходной величины от расстояния до объекта (в диапазоне $0\text{-}10\text{ cm}$ для данной модели датчика) и нелинейность характеристики преобразования (для всех датчиков данного типа).

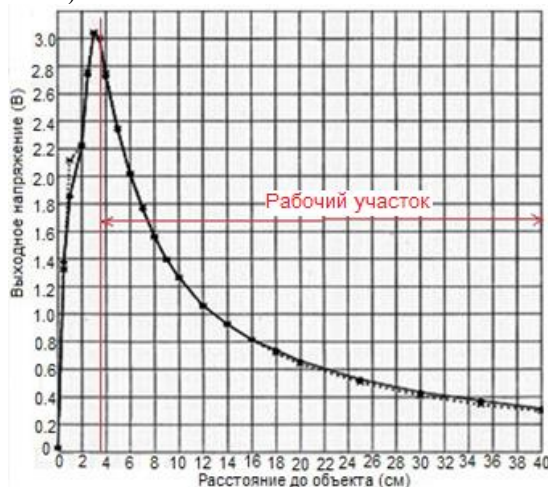


Рис. 3. Типовая зависимость напряжения на выходе датчика GP2Y0A21YK0F

Fig. 3. Typical dependence of the output voltage of the sensor GP2Y0A21YK0F

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для исключения неоднозначности показаний датчик располагают на корпусе робота так, чтобы данный участок характеристики не мог быть использован чисто физически, например, так, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Пример установки ИК-датчиков на корпусе МР Fig. 4. An example of installing IR sensors on the MR body

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для исключения влияния нелинейности обычно используют обратную зависимость показаний датчика от расстояния, поскольку в этом случае имеется небольшой более-менее линейный участок (рис. 5) [12]. Линейный участок на этом графике совсем небольшой, что существенно снижает динамический диапазон работы датчика.

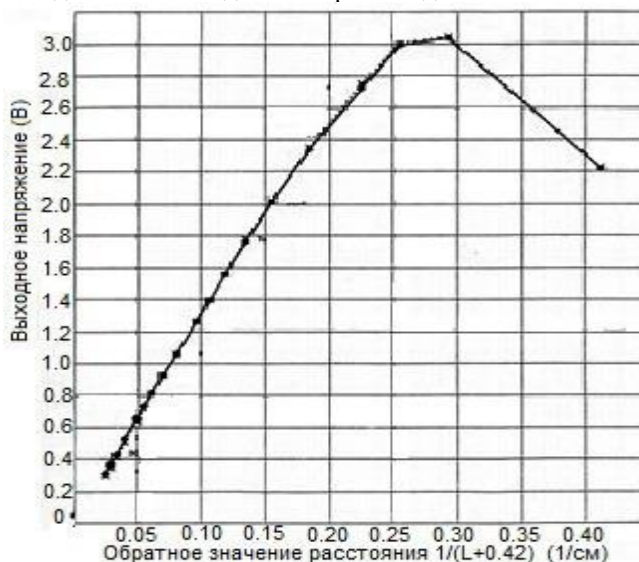


Рис. 5. Обратная зависимость напряжения на выходе датчика Fig. 5. Inverse dependence of the output voltage of the sensor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для использования всего нелинейного участка характеристики предлагается в процессе калибровки датчика определить функцию, аппроксимирующую данную нелинейность. Эксперименты показали, что данная нелинейность хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$y = a \cdot x^b,$$

где a , b – коэффициенты аппроксимации для конкретного датчика, определяемые в процессе калибровки.

Перед использованием датчиков данного типа требуется их калибровка, поскольку наблюдается разброс параметров a и b для разных образцов.

Но возникает проблема организации вычисления по приведённой формуле расстояния y по аналоговым значениям показаний x датчика – затратная операция умножения и ещё более затратная операция возведение в нецелую степень. Однако данная проблема легко разрешается, если аналоговые значения показаний преобразовать в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что всё равно придётся сделать с целью цифровой обработки в системе управления (СУ) робота. Тогда в ячейки памяти микроконтроллера системы управления, адрес которых соответствует цифровым значениям на выходе АЦП, достаточно занести точные значения расстояний,

полученные в процессе калибровки или предварительно вычисленные на ЭВМ по приведённой формуле. В результате в процессе движения робота его системе управления достаточно будет по текущим цифровым значениям дальности считывать из этого массива соответствующие значения расстояния в метрической системе. Но можно этого и не делать – просто дальность будет измеряться не в сантиметрах, а в некоторых целочисленных единицах в диапазоне, определяемом разрядностью АЦП – для вычислительного процесса СУ робота это неважно, поскольку все пороговые значения дальности можно также указать в единицах разрядности АЦП.

Помехи в канале передачи аналогового сигнала

В большинстве случаев для преобразования аналогового сигнала датчика в цифровую форму используют АЦП, входящий в состав микроконтроллера СУ робототехнического устройства. В этом случае приходится передавать сигнал с многочисленных датчиков, обычно устанавливаемых по периметру корпуса робота, в микроконтроллер, который, как правило, располагается на значительном расстоянии от датчиков – внутри корпуса робота. В этом случае возникает проблема искажения сигнала в коммуникационном канале передачи данных из-за влияния электромагнитных полей, создаваемых приводами МР.

В процессе проведения экспериментов по использованию в сенсорной системе МР аналоговых датчиков типа GP2Y0A (SHARP) оказалось, что в коммуникационном канале присутствует не только флуктуационный шум, но и наличествуют артефакты (рис. 6) – со случайной периодичностью появляются аномальные значения сигнала. Причём такие артефакты возникали как при использовании разных видов микроконтроллеров со встроенными АЦП, так и разных моделей датчика [6, 7, 13-15]. Следует заметить, что артефакты наблюдаются в целой последовательности измерений сигнала – n . Данное явление приводит к искажениям в показаниях дальности до препятствия, что равносильно ложному обнаружению близко расположенного препятствия на пути робота и соответствующей реакции его СУ.

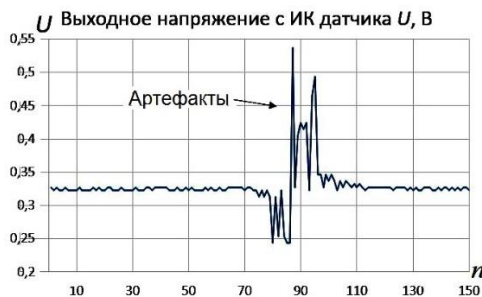


Рис. 6. Выходной сигнал датчика (n – количество измерений сигнала)

Fig. 6. Sensor output signal (n is the number of signal measurements)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эксперименты проводились с использованием следующего оборудования: ИК-датчик GP2Y0A21YK0F, микроконтроллер Arduino Uno, стандартный ПК.

Эксперимент 1. Цель: исследовать параметры канала передачи аналоговых данных ИК датчика GP2Y0A21YK0F.

Схема установки приведена на рис. 7. Датчик зафиксирован на жёсткой поверхности перпендикулярно рабочей плоскости (стол). Препятствие, представляющее собой плоский объект из картона, ориентировано перпендикулярно столу и параллельно рабочей плоскости датчика.

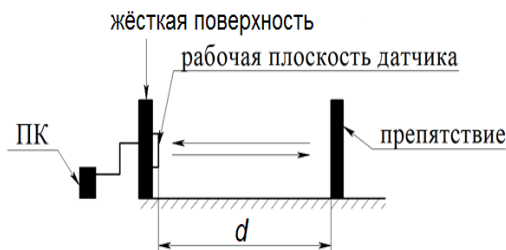


Рис. 7. Схема установки (d – расстояние от датчика до объекта)

Fig. 7. Installation scheme (d – distance from the sensor to the object)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Схема подключения датчика к микроконтроллеру приведена на рисунке 8. Микроконтроллер Arduino Uno подключён к ПК по кабелю USB-A, питание микроконтроллера осуществляется от ПК по тому же кабелю. Аналоговый выход датчика подключён проводом длиной $L_1 = 18$ см к входу АЦП микроконтроллера. Электропитание датчика осуществляется от специальных выводов +5В и GND микроконтроллера.

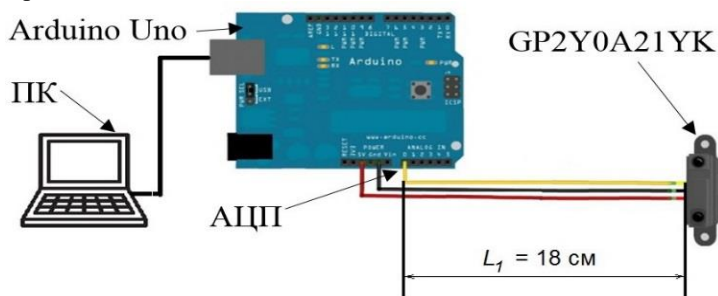


Рис. 8. Схема эксперимента 1 (L_1 – длина проводников) Fig. 8. Experiment 1 (L_1 – length of conductors)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измерения проводились на расстояниях $d = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ и 80 см датчика от препятствия. На каждом расстоянии автоматически производилось по $n = 150$ измерений с периодичностью 55 мс, при этом выполнялось по $h = 5$ попыток со случайной периодичностью (~ 2 сек, ручной запуск). По завершении измерений для каждого расстояния d вычислялись: среднеквадратичное отклонение (σ) и среднее значение (m). В качестве показателя «зашумлённости» канала принималось количество k значений сигнала датчика, превышающих величину среднего значения сигнала m на $1\sigma, 2\sigma, 3\sigma, 4\sigma$ и 5σ . Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Статистика появления аномальных значений сигнала в эксперименте 1
Statistics of the occurrence of anomalous signal values in experiment 1

d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:					d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:				
		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ			1σ	2σ	3σ	4σ	5σ
10	1	16	16	10	0	0	20	20	14	5	0	0	
	2	16	16	0	0	1		20	14	8	0	0	
	3	16	16	5	0	0		20	11	2	4	0	
	4	14	14	10	0	0		23	15	8	0	0	
	5	13	13	10	0	0		23	13	7	0	0	
30	1	23	12	2	1	0	40	24	12	7	0	0	
	2	20	11	2	2	0		22	12	6	0	0	
	3	20	11	6	0	0		23	9	8	0	0	
	4	21	12	5	1	0		23	12	7	0	0	
	5	22	12	3	1	0		22	10	0	0	0	
50	1	8	8	1	7	0	60	54	2	1	0	0	
	2	5	5	0	0	5		8	8	5	5	0	
	3	4	4	0	0	4		17	1	0	0	1	
	4	3	3	0	0	3		6	6	3	3	0	
	5	10	10	10	0	0		5	5	0	5	0	
70	1	20	8	0	0	1	80	26	14	7	0	0	
	2	12	12	0	1	2		23	14	7	0	0	
	3	20	14	1	3	0		18	1	0	0	1	
	4	10	10	0	6	0		19	13	5	1	0	
	5	1	1	0	0	1		18	12	3	3	0	

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вывод:

Показания датчика нестабильны. Наблюдается значительное количество *k* отклонений измеренных значений от среднего (выделено жирным шрифтом), превышающее 3σ , в ряде случаев наблюдается превышение в 5σ . Для худшего случая значение отношения сигнал/шум (m/σ) составляет 3.4.

Гипотеза. Помехи возникают из-за наводок в канале передачи аналоговых данных от датчика к АЦП микроконтроллера.

Эксперимент 2. Цель: исследовать параметры канала передачи аналоговых данных ИК-датчика GP2Y0A21YK0F при минимальной длине канала передачи аналогового сигнала.

Для уменьшения длины информационного проводника используется отдельный однокристальный АЦП ADS1015, который устанавливается в максимальной близости от датчика. В результате длина проводника $L_1 = 3$ см (Рис. 9).

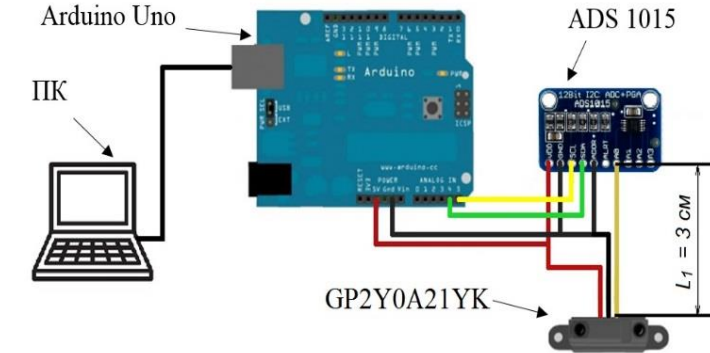


Рис. 9. Схема эксперимента 2 (L_1 – длина проводников) Fig. 9. Scheme of the experiment 2 (L_1 – length of conductors)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналого-цифровой преобразователь ADS1015 – это 12-разрядный АЦП, конструктивно выполненный в виде микросхемы. Обмен информацией между управляющим устройством (микроконтроллером) и АЦП происходит по протоколу I2C. Выводы АЦП SCL и SDA предназначены для передачи информации по протоколу I2C, вывод ADDR служит для установки адреса модуля, вывод ALERT – выход компаратора, используемый для оповещения управляющего устройства. В микроконтроллере используются входы АЦП A0, A1, A2, A3. Электропитание датчика и АЦП осуществляется от специальных выводов +5V и GND микроконтроллера.

Все измерения проводились аналогично эксперименту 1. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Статистика появления аномальных значений сигнала в эксперименте 2
Statistics of the occurrence of anomalous signal values in experiment 2

d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:					d , см	Кол-во k значений сигнала больше:				
		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ
10	1	59	6	0	0	0	20	62	11	0	0	0
	2	58	5	0	0	0		51	5	0	0	0
	3	60	7	0	0	0		68	3	0	0	0
	4	54	5	0	0	0		56	1	0	0	0
	5	57	5	0	0	0		65	1	0	0	0
30	1	57	3	1	0	0	40	50	9	0	0	0
	2	50	3	1	0	0		48	6	0	0	0
	3	71	4	0	0	0		44	8	0	0	0
	4	36	3	0	0	0		44	7	0	0	0
	5	81	3	0	0	0		51	6	0	0	0
50	1	38	0	0	0	0	60	81	0	0	0	0
	2	43	10	0	0	0		40	1	0	0	0

Продолжение таблицы 2. *Continuation of Table 2.*

	3	42	3	0	0	0		39	3	1	0	0
	4	80	1	0	0	0		58	2	0	0	0
	5	35	5	0	0	0		77	4	1	0	0
70	1	49	8	1	0	0	80	37	5	0	0	0
	2	53	7	1	0	0		37	4	0	0	0
	3	49	7	2	0	0		83	5	0	0	0
	4	53	9	0	0	0		38	3	0	0	0
	5	24	13	0	0	0		81	3	0	0	0

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.***Вывод:**

При использовании внешней микросхемы АЦП, подключённого коротким проводом длиной $L_1 = 3$ см, количество k отклонений измеренных значений от среднего, превышающее 3σ существенно меньше. Значение отношения сигнал/шум m/σ для худшего случая составляет 25.7, что значительно лучше результата из эксперимента 1 ($m/\sigma = 3.4$).

Полагаем, что наводки возникают в канале передачи аналоговых данных от датчика на вход устройства обработки.

Дифференциальный метод определения формы препятствия

Дифференциальный метод определения формы препятствия был предложен ещё в 2017г. в статье [14, 15], но для случая применения сканирующего ультразвукового датчика расстояния типа HC-SR04, выходной сигнал которого представляет собой импульс с длительностью, пропорциональной расстоянию. В этом случае влияние внешних факторов на коммуникационный канал отсутствует. Для определения ориентации и формы препятствия дифференциальным методом следует при обнаружении объекта определить расстояние как минимум до 2-х точек на его поверхности (рис.10).

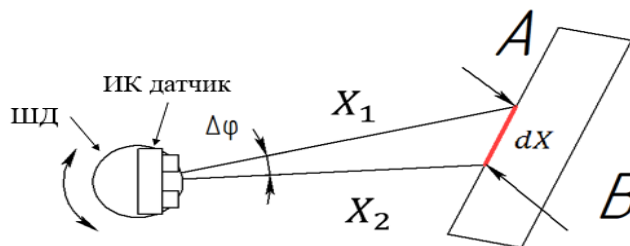


Рис. 10. Дифференциальный метод определения формы или ориентации препятствия *Fig. 10. Differential method for determining the obstacle shape or orientation*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Из схемы на рисунке видно, что измеренное расстояние до препятствия будет зависеть от угла поворота вала двигателя $\Delta\varphi$; это можно выразить функцией $X(\varphi)$. Вычислив первую производную данной функции

$$\frac{dX}{d\varphi} = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{X(\varphi + \Delta\varphi) - X(\varphi)}{\Delta\varphi},$$

можно определить ориентацию препятствия относительно датчика.

Границы объекта определяются по второй производной функции $X(\varphi)$:

$$\frac{d^2X}{d\varphi^2} = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{X(\varphi + \Delta\varphi) - 2X(\varphi) + X(\varphi - \Delta\varphi)}{\Delta\varphi^2}$$

при фиксации положений вала двигателя, при которых $\frac{d^2X}{d\varphi^2} \neq 0$, а знак производной будет указывать на начало и конец объекта

Данный подход с использованием ИК-датчика расстояния, был описан в 2020г. в работе [7], однако результаты оказались неудовлетворительными даже при применении стандартных методов фильтрации флуктуационных шумов (фильтрация по среднему, медианный фильтр и т.п., при значительном «окне» фильтрации). Лишь позже в 2022г. экспериментально была найдена причина – артефакты в коммуникационном канале [13].

Известно, что точность дифференциальных методов существенно зависит от точности исходных данных. В нашем случае на результат влияют неточности измерения дальности, вызванные помехами в каналах передачи данных от аналогового датчика в устройство обработки сигнала:

$$dX(\varphi) = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} [X(\varphi + \Delta\varphi) + n_1 - X(\varphi) + n_2],$$

где n_1, n_2 – помехи, вызванные флуктуационным шумом и аномальными значениями сигнала. Поэтому, для снижения влияния флуктуационного шума следует использовать обычный способ сравнения результатов вычислений с некоторым пороговым значением. Использование тех или иных статистических методов фильтрации шума требует значительного количества измерений, т.е. «окна фильтрации», что приводит к увеличению времени реакции системы управления МР.

С влиянием аномальных значений сигнала сложнее, поскольку, как следует из рис.6, они занимают значительное количество последовательных отсчётов n , и могут быть ложно приняты за объект сцены. Поэтому, как показали описанные эксперименты, снижение таких шумов достигается техническими средствами – использование цифровых коммуникационных каналов.

Проблемы организации сканирования

Для реализации дифференциального метода определения ориентации и размеров объектов важное значение имеют такие параметры сканирования сцены датчиком, как точность и повторяемость позиционирования датчика при его угловых перемещениях по горизонтали, организуемых поворотом вала двигателя по часовой стрелке и обратно. В работе [7] для организации сканирования был использован сервопривод. В процессе экспериментов оказалось, что не все типы сервоприводов обеспечивают требуемые точности позиционирования датчика. Поэтому предлагается использовать шаговый двигатель (ШД). Известный недостаток ШД – пропуск шагов при высоких нагрузках на вал двигателя, но в данном случае это исключено вследствие малого веса датчика.

Для исследования возможности использования шагового двигателя в системе сканирования была создана экспериментальная установка [13], состоящая из ШД типа 28BYJ-48 [16] и лазерной указки, закреплённой на оси двигателя (рис.11). Управление двигателем осуществлялось программно через драйвер ULN2003 [17] от микроконтроллера Arduino Uno, подключённого к стандартному ПК.



Рис. 11. Схема эксперимента с шаговым двигателем

Fig. 11. Scheme of the experiment with a stepper motor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экспериментальная установка зафиксирована перпендикулярно рабочей плоскости (стол) на расстоянии $L=262$ см от плоскости препятствия так, что след от лазера направлен перпендикулярно плоскости препятствия. Были рассчитаны точки M_i , в которых теоретически должен оказаться след от луча лазера при повороте вала двигателя на угол $\Delta\varphi = 5^\circ$, где крайние положения это $\varphi_1 = -15^\circ$ (точка A) и $\varphi_2 = +15^\circ$ (точка B) от начального положения (точка M_3).

Для качественной оценки точности были измерены отклонения следа лазера от рассчитанных точек (Рис.12) при движении следа лазера $A \Rightarrow B$ и $B \Rightarrow A$ (по часовой и против часовой стрелки поворота оси ШД). Также вычислялась относительная погрешность отклонение/расстояние до точки: $|\Delta X|/L$.

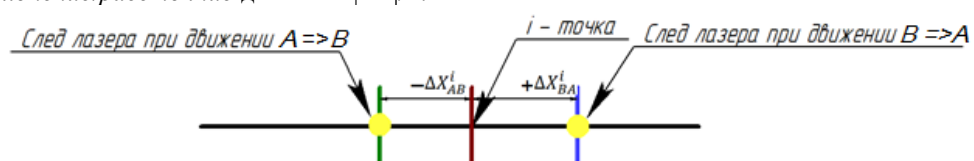


Рис. 12. Схема измерения погрешности позиционирования

Fig. 12. Scheme for measuring position error

Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Погрешность позиционирования ШД в i точках при φ_i углах поворота ($L = 262$ см)

Positioning error of the ball screw at i points at φ_i rotation angles ($L = 262$ cm)

i	φ_i , град.	ΔX_{AB}^i , см ($ \Delta X /L$), %	ΔX_{BA}^i , см ($ \Delta X /L$), %	$\Delta \varphi_{AB}^i$, град.	$\Delta \varphi_{BA}^i$, град.
1	-10	+1.0 (0.4)	+2.3 (0.9)	0.2	0.5
2	-5	+0.5 (0.2)	+2.2 (0.8)	0.1	0.5
3	0	0.0 (0.0)	+1.5 (0.6)	0.0	0.3
4	5	0.0 (0.0)	+1.7 (0.6)	0.0	0.4
5	10	-1.5 (0.6)	+0.6 (0.2)	0.3	0.1

Вывод:

Относительная погрешность не превышает 0,9%. Считаем, что полученная точность достаточна для использования шагового двигателя 28BYJ-48 в системе сканирования ИК-датчиком.

Заключение

В сенсорной системе МР с аналоговыми датчиками для снижения наводок в коммуникационном канале, по которому аналоговый сигнал передаётся в систему управления, не рекомендуется использовать АЦП микроконтроллера или иного обработчика информации. Необходимо преобразовывать аналоговый сигнал датчика в цифровую форму с помощью отдельного АЦП в интегральном исполнении, причём АЦП следует устанавливать в максимальной близости к датчику. В идеальном случае следует использовать датчики с интегрированным в датчик АЦП – цифровые датчики. Цифровая форма представления сигнала позволяет наиболее полно и точно представлять нелинейную передаточную функцию датчика, получаемую в процессе предварительной калибровки, что, в свою очередь, обеспечивает существенное снижение времени реакции системы управления МР за счёт простой выборки наиболее полного массива в памяти микроконтроллера необходимых значений показаний датчика.

Исключение влияния аномальных значений шума на выходной сигнал аналогового ИК-датчика расстояния типа GP2Y0A (SHARP) позволяет с допустимой для движения МР точностью использовать дифференциальный метод определения формы препятствия сенсорной системой МР.

Литература

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I. The Essential Algorithms // Robotics and Automation Magazine. 2006. Vol. 13, N2. pp. 99–110.
2. Kawewong A., Tongprasit S., Hasegawa O., et al. Online and Incremental Appearance-Based SLAM in Highly Dynamic Environments // International Journal of Robotics Research. 2011. Vol.30, N1. pp. 33-55.
3. Kamil F., Tang SH, Khaksar W., et al. A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments // Advances in Robotics & Automation. 2015. Vol. 4, Issue 2, 1000134. pp.1-8.
4. Инфракрасные датчики для роботов. Доступно по: <https://shamrin.ru/infra-krasnye-datchiki-dlya-robotov>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.
5. Определение расстояния до препятствия с помощью инфракрасного датчика учебной системы ROBOTINO. Доступно по: <https://masters.donntu.ru/2016/fknt/gorin/library/article6.htm>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.
6. Andreev V., Tarasova V. The Mobile Robot Control for Obstacle Avoidance with an Artificial Network Application. In: Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Published by DAAAM International. Vienna, Austria; 2019. pp.0724–0732.
7. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Идентификация объектов с помощью комплексирования показаний ультразвуковых и инфракрасных датчиков искусственной нейронной сетью // Труды 31-й Международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА; 28-29 сентября 2020г., С-Петербург: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2020. С.12–18.
8. Проблемы с функционированием аналоговых каналов. Доступно по: <https://imena-dlya-devochek.ru/problemy-s-funkcionirovaniem-analogovykh-kanalov>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

9. Влияние электромагнитных полей на цифровой сигнал. Доступно по: <https://queryzone.ru/article/96202-vliyanie-elektromagnitnykh-pomekh-na-tsifrovoy-signal>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

10. Платт Ч., Янссон Ф. Энциклопедия электронных компонентов // Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2017. 224 с.

11. Инфракрасный датчик расстояния: описание, подключение, схема, характеристики. Доступно по: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/infrakrasnyj-datchik-rasstojanija>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

12. Паспорт ИК-датчика GP2Y0A21YK0F. Доступно по: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

13. Бакулев Х.С. Определение размеров препятствия ИК-датчиком расстояния SHARP 2Y0A21 в сенсорной системе мобильного робота \ Материалы заключительного этапа студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2022)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. С.8–10. Доступно по: https://stankin.ru/uploads/files/file_62bc0e97cc696.pdf. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

14. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Мехатроника, Автоматизация, Управление. М.: Изд-во «Новые технологии». 2017. №11, Том 18. С.759–763.

15. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Идентификация объектов с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Труды Международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА; 02-03 ноября 2017г., С-Петербург. Санкт-Петербург: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017. С.222–230.

16. Шаговый двигатель 28BYJ-48. Доступно по: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/stepper-motor-28BYJ-48>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

17. Паспорт драйвера шагового двигателя ULN2003. Доступно по: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/uln2001.pdf>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

Автор публикации

Андреев Виктор Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Сенсорные и управляющие системы» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»).

References

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I. The Essential Algorithms // Robotics and Automation Magazine. 2006. Vol. 13, N2. pp. 99–110.

2. Kawewong A., Tongprasit S., Hasegawa O., et al. Online and Incremental Appearance-Based SLAM in Highly Dynamic Environments // International Journal of Robotics Research. 2011. Vol.30, N1. pp. 33–55.

3. Kamil F., Tang SH, Khaksar W., et al. A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments // Advances in Robotics & Automation. 2015. Vol. 4, Issue 2, 1000134. pp.1-8.

4. Infrakrasnyye datchiki dlya robotov. Available at: <https://shamrin.ru/infrakrasnyye-datchiki-dlya-robotov>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

5. Opredeleye rasstoyaniya do prepyatstviya s pomoshch'yu infrakrasnogo datchika uchebnoy sistemy ROBOTINO. Available at: <https://masters.donntu.ru/2016/fknt/gorin/library/article6.htm>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

6. Andreev V., Tarasova V. The Mobile Robot Control for Obstacle Avoidance with an Artificial Network Application. In: Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Published by DAAAM International. Vienna, Austria; 2019. pp.0724–0732.

7. Andreyev VP., Tarasova VE. Identifikatsiya ob"yektov s pomoshch'yu kompleksirovaniya pokazaniy ul'trazvukovykh i infrakrasnykh datchikov iskusstvennoy neyronnoy set'yu [Object Identification by Ultrasonic and Infrared Sensors Data Fusion Using Artificial Neural Network] // Trudy 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii EKSTREMAL'NAYA ROBOTOTEKHNIKA. 28-29 sentyabrya 2020. Sankt-Peterburg: ООО «Izdatel'sko-poligraficheskiy kompleks «Gangut», 2020. – Pp.12-18. (In Russ.).

8. Problemy s funktsionirovaniyem analogovykh kanalov. Available at: <https://imena-dlya-devochek.ru/problems-s-funktsionirovaniem-analogovykh-kanalov>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

9. Vliyanie elektromagnitnykh poley na tsifrovoy signal. Available at: <https://queryzone.ru/article/96202-vliyanie-elektromagnitnykh-pomekh-na-tsifrovoj-signal>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
10. Platt CH., Yansson F. Entsiklopediya elektronnykh komponentov, Sankt-Peterburg: BKHV-Peterburg, 2017. 224 P. (In Russ.).
11. Infekrasnyy datchik rasstoyaniya: opisaniye, podklyucheniye, skhema, kharakteristiki. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/infekrasnyj-datchik-rasstojaniya>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
12. Passport IK-datchik GP2Y0A21YK0F. Available at: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
13. Bakulev KH.S. Opredeleniye razmerov prepyatstviya IK-datchikom rasstoyaniya SHARP 2Y0A21 v sensornoy sisteme mobil'nogo robota. Materialy zaklyuchitel'nogo etapa studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomatizatsiya i informatsionnyye tekhnologii (AIT-2022)». Sbornik dokladov. – M.: FGBOU VO «MGU «STANKIN», 2022. – S.8-10. Available at: https://stankin.ru/uploads/files/file_62bc0e97cc696.pdf. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
14. Andreyev V.P., Tarasova V.E. Opredeleniye formy prepyatstviy mobil'nym robotom s pomoshch'yu skaniruyushchikh uglovykh peremeshcheniy ul'trazvukovogo datchika // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye. M.: Izd-vo «Novyye tekhnologii». 2017. No11, Vol 18. Pp.759 – 763. (In Russ).
15. Andreyev VP, Tarasova VE. Identifikatsiya ob'yektov s pomoshch'yu skaniruyushchikh uglovykh peremeshcheniy ul'trazvukovogo datchika / Ekstremal'naya robototekhnika (ER-2017). Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii; 02-03 noyabrya 2017. Sankt-Peterburg: IPTS OOO «Politekhnik-print», 2017. Pp.222–230. (In Russ).
16. Shagovyŭ dvigatel' 28BYJ-48. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/stepper-motor-28BYJ-48>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
17. Passport drayvera shagovogo dvigatelya ULN2003. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/uln2001.pdf>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

Author of the publication

Victor P. Andreev – Moscow State University of Technology «STANKIN».

Шифр научной специальности: 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Получено **19.11.2023 г.**

Отредактировано **25.12.2023 г.**

Принято **09.01.2024 г.**