DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-50-63**УДК 681.586.48**

МОДУЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРИЕМА УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Морохин Д.В., Тоцкий А.А.

Системы позиционирования в настоящее время широко используются в различных областях человеческой деятельности. Они позволяют с определенной точностью определить положение объекта в пространстве. Существуют системы глобального позиционирования, использующие для этой цели сигналы, передаваемые со спутников. К их недостаткам можно отнести относительно невысокую точность и затруднения при работе в помещениях. Системы локального позиционирования обладают более высокой точностью и могут использоваться в любых помещениях и территориях.

При работе над статьей были проанализированы современные методы и решения, используемые при построении локальных систем определения местоположения объекта. Предложена и построена модель системы локального позиционирования на основе ультразвуковых модулей.

В результате разработана структура и рабочая модель в виде устройств для излучения и приема ультразвукового импульса с высокой чувствительностью и широким телесным углом приема/излучения ультразвука, который можно успешно применить в системе локального позиционирования.

Для дальнейшего развития данной системы необходимо дополнительно включить в ее состав дублирующие способы измерения местоположения. Например, модуль лидара.

Ключевые слова: ультразвук; операционный усилитель; детектирование.

ULTRASOUND EMITTING AND RECEIVING MODULES FOR A LOCAL POSITIONING SYSTEM

Morohin D.V., Totsky A.A.

Positioning systems are now widely used in various fields of human activity. They allow with a certain accuracy to determine the position of an object in space. There are global positioning systems that use satellite signals for this purpose. Their disadvantages are relatively low accuracy and difficulties in premises. Local positioning systems have higher accuracy and can be used in any premises and territories.

During the work on the article, modern methods and solutions used in the construction of local systems for determining the location of the object were analyzed. A model of a local positioning system based on ultrasonic modules has been proposed and built.

As a result, a structure and working model has been developed in the form of devices for emitting and receiving an ultrasonic pulse with a high sensitivity and a wide solid angle of reception / emission of ultrasound, which can be successfully applied in a local positioning system.

For the further development of this system, it is necessary to additionally include in its composition duplicate methods of measuring location. For example, the lidar module.

Keywords: *ultrasound; operational amplifier; detection.*

Введение

Системы позиционирования позволяют определять положение объектов в пространстве. Они могут быть глобальными и локальными. Глобальные системы позиционирования используют сеть спутников для определения местоположения объекта на поверхности планеты. Локальные системы позиционирования решают другую задачу: они осуществляют позиционирование в тех местах, где глобальное позиционирование невозможно (склады и любые другие закрытые помещения) и/или точность систем глобального позиционирования (1–2 м) недостаточна. Локальные системы

позиционирования могут быть построены на основании широкого спектра разнообразных технологий для измерения расстояний. Распространены локальные системы позиционирования, определяющие позицию объекта при помощи технологии RFID. Возможно для определения местоположения использовать сотовые сети и сети Wi-Fi. Также известны системы позиционирования на основе инфракрасного излучения и на основе ультразвука. Преимущество системы с ультразвуковым способом измерения – высочайшая точность позиционирования (около 3 см). В данной статье приводится результат разработки для этой системы модулей приема и излучения ультразвука, наиболее подходящие для работы системы.

Примером системы локального позиционирования данного типа является система, описанная в статье Русакова Д.А., представляющего Московский Технологический Университет [6]. В этой версии системы реализована технология определения положения при помощи ультразвуковых импульсов. Тем не менее, в данной системе для излучения ультразвуковых импульсов используются ультразвуковые дальнометры HC-SR04. Задачей данного дальнометра по своей сути является измерение расстояния, по этой причине ультразвук излучается в достаточно узким пучком. Поэтому использование данных модулей позволяет построить системы позиционирования, но очень сильно ограничивает ее работоспособную площадь, т. к. излучатели и приемники всегда должны быть направлены в сторону друг друга. Для устранения данного недостатка возможно пойти по пути увеличения количества модулей ультразвука, и их радиальной расстановки на излучателях и приемниках. Но данный выход не будет оптимальным, т. к. для покрытия полной окружности необходимо 12 дальнометров, что является достаточно большим количеством, и ведет к удорожанию системы. Также, при использовании такого количества дальнометров на приемниках, могут возникнуть сложности при подключении. Автором данной статьи были разработаны модули излучения и приема ультразвука, в которых данные недостатки устранены либо значительно смягчены.

Требования к модулям

К этим модулям были предъявлены следующие требования: значительный телесный угол работы (как у приемников, так и у излучателей), достаточная чувствительность (сигнал должен приниматься на расстоянии 6 м), удобство подключения к современным микроконтроллерам, возможность легкого изменения схемы при необходимости получения других характеристик.

Для выполнения первого условия было решено найти ультразвуковые датчики/излучатели с широким телесным углом приема/излучения ультразвука. Для этого использовались модули МА40S4R и МА40S4S соответственно. Они обеспечивают хороший телесный угол в 80 градусов. Также данные модули обладают хорошей чувствительностью.

Как известно, микроконтроллеры работают преимущественно с дискретными сигналами. Поэтому для приемных устройств было бы удобно реализовать какую-либо дискретизацию входного сигнала, приведение его к цифровой форме. Для излучателей же было бы эффективным реализовать включение и выключение генерации ультразвуковых волн по дискретному потенциальному сигналу, а не осуществлять высокочастотную генерацию непосредственно силами микроконтроллера. В таком случае вычислительная нагрузка на микроконтроллер будет минимальна.

Схема излучения ультразвукового импульса

Схема излучателя ультразвука приведена на рис. 1. Ее основной частью является одна из разновидностей таймеров серии 555, в частности, NE555. В данном случае он подключен по схеме работы в режиме генератора [10, с. 303–304]. Контакт R таймера является сигналом сброса, и является управляющим сигналом, который присоединяется к микроконтроллеру. При подаче на него низкого уровня напряжения таймер начинает генерировать колебания. Временязадающая цепочка состоит из резисторов R_a и R_b , а также конденсатора C_1 . Период колебания рассчитывается по следующей формуле: $T=0.693(R_a+2R_b)C_1$. Принцип работы этой

схемы таймера для генерации состоит в следующем. Контакт DIS (от англ. discharge – разрядка), в зависимости от уровня выходного сигнала, может находиться в двух состояниях: в z-состоянии или подключенный к земле. При включении схемы, если конденсатор разряжен, таймер оказывается в состоянии, когда выходной сигнал имеет уровень логической единицы; в этом случае контакт DIS переводится в z-состояние и конденсатор C_1 начинает заряжаться через резисторы R_a и R_b . При достижении на конденсаторе напряжения, равному $2/3 U_n$, вход THR (от англ. threshold – порог) переключается, и выходной сигнал переходит в состояние логического нуля. Одновременно с этим контакт DIS переводится в состояние соединения с землей, и конденсатор C_1 разряжается через резистор R_b и контакт DIS. При опускании напряжения на конденсаторе до $1/3 U_n$ контакт THR вновь переключается, выходной сигнал возвращается в состояние логической единицы, контакт DIS переходит в z-состояние и цикл генерации начинается снова.

Рис. 1. Схема модуля излучения ультразвука

Для оптимальной генерации ультразвуковых колебаний модулями МА40S4S необходим дискретный периодический сигнал

с коэффициентом заполнения, как можно более близким к 50%. Поскольку зарядка конденсатора C1 происходит через последовательное соединение резисторов R_a и R_b , а разрядка – только через резистор R_b , то такой коэффициент можно получить лишь в том случае, когда $R_b = 0$, при наличии же сопротивления R_b в этой схеме коэффициент заполнения будет всегда больше 50%. Но при $R_b = 0$ в случае соединения контакта DIS с землей произойдет короткое замыкание. Поэтому резистор R_a подбирался таким образом, чтобы был как можно меньше, но, тем не менее, достаточно существенно ограничивал ток от источника питания на землю во время фазы разрядки конденсатора.

Теоретически, модули излучения ультразвука можно было бы подключить на прямую к выходу генератора, но это не является оптимальным решением по двум причинам. Первая причина заключается в том, что модули излучения являются пьезоэлементами, которые по своим свойствам близки к конденсаторам, и при параллельном подключении они создают колебательную систему. Поскольку емкостные параметры каждого модуля имеют определенный разброс, колебания соединенных модулей будут мешать колебаниям друг другу, тем больше, чем больше разность в их параметрах. Вторая причина заключается в том, что выход таймера NE555 рассчитан на достаточно небольшой предельный выходной ток в 225 мА. Подключение к нему нескольких модулей излучения, представляющих собой конденсаторы, создает значительную нагрузку для выхода таймера в начальный момент зарядки, что является нежелательным эффектом. Для решения этих проблем было принято решение использовать операционные усилители. В этой и следующей схемах использовались операционные усилители MCP6022. Они были выбраны, потому что удовлетворяют следующим требованиям: размах выходного напряжения — от уровня земли до уровня питания (rail-to-rail), широкая полоса пропускания (10 МГц), а также потребность в низком напряжении питания (от 2,5 В до 5,5 В). В данном случае операционные усилители подключены по схеме повторителя [10, с. 186]. Это подключение поддерживает напря-

жение на выходе ОУ равным напряжению на неинвертирующем входе. Суть этого подключения в нашей схеме в том, что вход ОУ представляет собой очень большое сопротивление (как правило, на уровне мегаом), что разгружает выход таймера от низкоомной нагрузки в виде непосредственно подключенных модулей излучения. С другой стороны, модули излучения теперь не соединены между собой, поэтому не мешают колебаниям друг друга.

Схема приема ультразвукового импульса

Рис. 2. Схема модуля приема ультразвука

Схема приема ультразвука приведена на рис. 2. В ней полученный модулем приема ультразвуковой сигнал усиливается и дискретизируется, а результаты дискретизации нескольких модулей объединяются логическим элементом ИЛИ.

ОУ DD1.1 в этой схеме создает т. н. «виртуальную землю» для всей схемы. Особенность работы ОУ состоит в том, что при его подключении к напряжению питания для ОУ уровнем напряжения земли автоматически становится уровень напряжения, равный по-

ловине от напряжения питания (относительно точки с нулевым потенциалом). По этой причине для усиления сигналов необходимо реализовать такую точку схемы, напряжение в которой будет равно половине напряжения питания схемы, а также чтобы ее входной импеданс был низок. ОУ DD1.1 подключен по схеме повторителя, рассмотренной ранее, но на его неинвертирующий вход подается напряжение с делителя напряжения, с одинаковыми плечами. Данная схема реализует точку, напряжение в которой равно половине напряжения питания, что и будет являться «землей» для одной из последующих схем, в частности, усилителей.

Схемы подключения DD1.2 и DD2.1 представляют собой неинвертирующие усилители [10, с. 185]. Коэффициент усиления таких усилителей равен $K_{yc} = 1 + R_7/R_5 = 11$. Эта схема оказалась предпочтительнее инвертирующего усилителя, поскольку обеспечивает очень высокое входное сопротивление, что является более предпочтительным, при работе со слабыми сигналами, генерируемыми модулем приема.

После усиления сигнал попадает на схему компаратора [10, с. 245–246]. Эта схема представляет собой ОУ без какой-либо обратной связи. По этой причине выход ОУ очень быстро насыщается в положительную или отрицательную сторону (т. е. становится равен одному из напряжений питания). Если напряжение на инвертирующем входе больше, чем на неинвертирующем, то напряжение на выходе становится равным отрицательному напряжению питания, иначе - положительному. В нашей схеме на неинвертирующий вход подается напряжение с усилителя, а на инвертирующий - пороговое напряжение срабатывания схемы, созданное делителем напряжения. При улавливании ультразвука напряжение на неинвертирующем входе половину периода будет превышать напряжение на инвертирующем входе, и на выходе компаратора будет появляться логическая единица, в остальное время с выхода будет сниматься логический ноль. Можно заметить, что в делителе напряжения нижнее плечо незначительно больше верхнего плеча. Это сделано по следующей причине. При отсутствии принимаемого ультразвука

модулем приема сигнал, снимаемый с усилителя, будет находиться около уровня напряжения «виртуальной земли», равной половине напряжения питания. Но в нем будут присутствовать определенные шумы. Если плечи будут одинаковыми, то малейшие колебания напряжения из-за шума на неинвертирующем входе будут вызывать постоянные переходы выхода компаратора из отрицательного насыщения в положительные и обратно, что не является желаемым. Данное различие в плечах делителя напряжения создает некоторый порог защиты от шума и ложных срабатываний схемы из-за него.

Поскольку одним модулем приема покрывается не такой значительный угол, то требуется объединение результатов работы нескольких таких схем. Т. к. наличие сигнала обозначается логической единицей, то для объединения работы этих схем лучше всего подходит микросхема логического ИЛИ. При улавливании хотя бы одним модулем приема ультразвуковых колебаний выход этой схемы будет установлен в логическую единицу, независимо от того, принимают ли этот сигнал другие модули приема, или нет.

Заключение

Прототипы данных устройств были собраны и протестированы. Они обеспечивают улавливание ультразвукового сигнала на расстоянии 6 м, и при использовании 2-х излучателей и приемников в схеме допустимые углы излучения и приема в 140 градусов. Данные модули были применены при построении системы позиционирования при помощи ультразвука [9].

Список литературы

1. Ассур О.С. Исследование и разработка методов повышения точности определения местоположения объектов в пространстве с использованием технологий беспроводных сетей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Ассур Олег Сергеевич; [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет»]. г Москва, 2017. 157 с.

2. Высокоточные автономные системы локального позиционирования: [Электронный ресурс] // RealTrac Technologies. г. Санкт-Петербург, URL: https://real-trac.com/ru/company/blog/vysokotochnye_avtonomnye_sistemy_lokal_nogo_pozicionirovaniya/ (дата обращения: 18.07.2019).
3. Михайлов, А.А. Математическое и программное обеспечение решения задачи позиционирования мобильных средств в системах автоматизации внутрицехового транспорта и складского хозяйства химических производств: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.06. Москва, 2007. 133 с.
4. Морохин Д.В., Суслов П.А., Тоцкий А.А. Локальная система определения координат // Ресурсы робототехнических конструкций как инструмента воспитания и образования детей и юношества. Сборник статей по материалам круглого стола в рамках XIX Вавиловских чтений – международной междисциплинарной научной конференции. ФГБОУ ВО «ПГТУ». Йошкар-Ола, 2016. С. 117–123.
5. Программа для визуализации и управления системой локального позиционирования на основе ультразвука, версия 1.0: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No 2018612935 Российская Федерация/ А.А. Тоцкий, Д.В. Морохин. -No2018610013; заявл. 09.01.2018; опубл. 01.03.2018, Бюл.№3.
6. Русаков Д.А. Ультразвуковая локальная система позиционирования // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Труды XXIV Международной научно-технической конференции, (14-20 сентября 2015 г., Алушта). Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 272-273. 300 с.
7. Системы локального позиционирования: [Электронный ресурс] // Компания «ЭФО». г. Санкт-Петербург, URL: <http://www.wless.ru/technology/?tech=11/> (дата обращения: 18.07.2019).
8. Системы локального позиционирования «RTLS»: [Электронный ресурс] // ООО «RTLS». г. Москва, URL: <https://www.komset.ru/produkty/sistemy-lokalnogo-pozitsionirovaniya-rtls/> (дата обращения: 18.07.2019).
9. Тоцкий А.А. Разработка масштабируемой локальной системы определения местоположения мобильного объекта / Тоцкий А.А.,

- Морохин Д.В. // International Journal of Advanced Studies (Международный журнал перспективных исследований), Том 8, №1-2. Красноярск: Научно-Инновационный центр, 2018. С. 105–114.
10. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. Изд. 2-е. М.: Издательство БИНОМ. 2015. 704 с.
 11. Chen B.H., Palamara M.E., Varvaro C. Local positioning system. <https://www.google.com/patents/US6748224> US6748224 US Patent 6748224 – Local positioning system – Lucent.
 12. Hjelm, Johan; Kolodziej, Krzysztof W. (2006). Local positioning systems LBS applications and services ([Online-Ausg.] ed.). Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis. ISBN 978-0849333491.
 13. Kumar R., Sarangi S., Shukla A., Arakere M.G. / Location guidance of robots using local positioning system // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 402, 2018.
 14. Kyker, R (7–9 Nov 1995). “Local positioning system”. WESCON/’95. Conference Record. ‘Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies’: 756. doi:10.1109/WESCON.1995.485496. ISBN 978-0-7803-2636-1.
 15. Schmidt D. Local positioning system. <https://www.google.com/patents/US20040056798> US20040056798 US Patent US20040056798 – Local positioning system – Gallitzin Allegheny.

References

1. Assur O.S. *Issledovanie i razrabotka metodov povysheniya tochnosti opredeleniya mestopolozheniya ob'ektov v prostranstve s ispol'zovaniem tekhnologiy besprovodnykh setey* [Research and development methods to improve the accuracy of determining the location of objects using wireless networks]. Moscow, 2017. 157 p.
2. *Vysokotochnnye avtonomnye sistemy lokal'nogo pozitsionirovaniya* [High-precision autonomous local positioning systems]: RealTrac Technologies. Sankt-Peterburg, https://real-trac.com/ru/company/blog/vysokotochnnye_avtonomnye_sistemy_lokal_nogo_pozicionirovaniya/
3. Mikhaylov A.A. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie resheniya za-dachi pozitsionirovaniya mobil'nykh sredstv v sistemakh avtom-*

- atizatsii vnutritsekhovogo transporta i skladского khozyaystva khimicheskikh proiz-vodstv* [Mathematical and software solutions to the problem of the positioning mobile devices in the automation systems of intrashop transport and warehousing of chemical plants]: Moscow, 2007. 133 p.
4. Morokhin D.V., Suslov P.A., Totskiy A.A Lokal'naya sistema opredeleniya koordinat [Local coordinate system]. *Resursy robototekhnicheskikh konstruksiy kak instrumenta vospitaniya i obrazovaniya detey i yunoshstva. Sbornik statey po materi-alam kruglogo stola v ramkakh KhIKh Vavilovskikh chteniy - mezhdunarodnoy mezhdistsiplinarnoy nauchnoy konferentsii* [Resources of robotic structures as a tool for the upbringing and education of children and youth. A collection of articles on round-table materials within the framework of the 19th Vavilov Readings - an international interdisciplinary scientific conference]. FGBOU VO "PGTU". Yoshkar-Ola, 2016, pp. 117–123.
 5. *Programma dlya vizualizatsii i upravleniya sistemoy lokal'nogo pozitsi-onirovaniya na osnove ul'trazvuka* [Visualization and control program of the ultrasonic local positioning system], versiya 1.0: svi-detel'stvo o gosudar-stvennoy registratsii programm dlya EVM No 2018612935 Rossiyskaya Federatsiya. A.A. Totskiy, D.V. Morokhin. -No2018610013; zayavl. 09.01.2018; opubl. 01.03.2018, Byul.No3.
 6. Rusakov D.A. Ul'trazvukovaya lokal'naya sistema pozitsionirovaniya [Ultrasonic local positioning system]. *Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii: Trudy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konfe-rentsii, (14–20 sentyabrya 2015 g., Alushta)* [Modern technologies in the problems of control, automation and information processing: Proceedings of the XXIV International scientific and technical conference, (September 14-20, 2015, Alushta)]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015, pp. 272–273. 300 p.
 7. *Sistemy lokal'nogo pozitsionirovaniya* [Local positioning systems]. Kompaniya "EFO". Sankt-Peterburg, [http://www.wless.ru/ technology/?tech=11](http://www.wless.ru/technology/?tech=11).
 8. *Sistemy lokal'nogo pozitsionirovaniya «RTLS»* [Local positioning systems «RTLS»]. ООО «RTLS». g. Moskva, <https://www.komset.ru/produkty/sistemy-lokalnogo-pozitsionirovaniya-rtls/>

9. Totskiy A.A., Morokhin D.V. Razrabotka masshtabiruemoy lokal'noy sistemy opredele-niya mestopolozheniya mobil'nogo obekta [Development of a scalable local system for determining the location of a mobile object]. *International Journal of Advanced Studies* 8, №1-2. Krasnoyarsk, 2018, pp. 105–114.
10. Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki* [The art of circuitry]. M.:Izdatel'stvo BINOM, 2015. 704 p.
11. Chen B.H., Palamara M.E., Varvaro C. Local positioning system. <https://www.google.com/patents/US6748224> US6748224 US Patent 6748224 – Local positioning system – Lucent
12. Hjelm, Johan; Kolodziej, Krzysztof W. (2006). Local positioning systems LBS applications and services ([Online-Ausg.] ed.). Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis. ISBN 978-0849333491.
13. Kumar R., Sarangi S., Shukla A., Arakere M.G. Location guidance of ro-bots using local positioning system. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 402, 2018
14. Kyker, R (7–9 Nov 1995). “Local positioning system”. WESCON/'95. Conference Record. ‘Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies’: 756. doi:10.1109/WESCON.1995.485496. ISBN 978-0-7803-2636-1.
15. Schmidt D. Local positioning system. <https://www.google.com/patents/US20040056798> US20040056798 US Patent US20040056798 – Local positioning system – Gallitzin Allegheny

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Морохин Дмитрий Витальевич, доцент кафедры ИВС ПГТУ,
кандидат технических наук, доцент
*Поволжский государственный технологический университет
пл. Ленина, 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000,
Российская Федерация
dmitry@mail.ru*

Тоцкий Алексей Андреевич, студент ФИиВТ группы ИВТм-21
Поволжский государственный технологический университет

*пл. Ленина, 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000,
Российская Федерация
alex.totsky@yandex.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Morokhin Dmitry Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

*Volga State Technological University
3, Lenin, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian
Federation
dymitry@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0005-3976*

Totsky Aleksey Andreevich, student

*Volga State Technological University
3, Lenin, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian
Federation
alex.totsky@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-0632-3500*