

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

*Юлдашев М.Н.*

*Научный руководитель: Юдин А.В.*

МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Россия

## ULTRASONIC SYSTEM FOR DETERMINING THE SPATIAL POSITION OF THE MOBILE OBJECT

*Yuldashev M.N.*

*Supervisor: Yudin A.V.*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### **Аннотация**

В статье рассматриваются системы измерения пространственного положения мобильного робота. Поставлена задача анализа существующих систем навигации с целью построения надежной и дешевой системы с точностью, необходимой для корректного функционирования робота. Приведен геометрический расчет системы определения координат мобильного робота с параллельным режимом приема сигнала. Кратко представлено описание разрабатываемой системы, её преимущества и недостатки. В заключении указаны результаты проделанной работы.

### **Abstract**

The article deals with the measurement system of the spatial position of the mobile robot. The task was set to analyze existing navigation systems in order to build a reliable and low-cost system with the precision required for the correct functioning of the robot. Moreover, the article presents a geometric-mechanical calculation positioning system of a mobile robot with a parallel mode of signal reception. The system is briefly described, paying attention to its advantages and disadvantages. In conclusion, the results of this work are listed.

### **Введение**

В настоящее время мобильные роботы набирают все большую и большую популярность в различных направлениях, начиная от промышленных робототехнических систем и заканчивая роботами-пылесосами. Одной из основных проблем робототехники является самостоятельная навигация мобильных роботов в пространстве. Для того, чтобы робот был эффективен, он должен уметь строить оптимальные маршруты максимально быстро и точно, чтобы управлять параметрами своего движения (угол поворота, скорость вращения колес).

На данный момент разработано множество алгоритмов, отвечающих за построение оптимального маршрута, которые достаточно быстро и точно выполняют свою функцию [1]. При этом программист, реализующий данные алгоритмы, имеет точные координаты объекта, что в реальных условиях получить для робота весьма проблематично.

Для определения собственных координат робот использует ряд датчиков, которые позволяют ему ориентироваться в пространстве. В настоящее время принцип работы данной схемы представляет собой непрерывный цикл: «опрос датчика – получение данных – корректировка маршрута». При использовании данного принципа возникают технические сложности мобильной навигации:

1. Для построение оптимального маршрута роботу необходимо воссоздать максимально точный образ окружающего пространства.

2. При движении робот должен максимально точно управлять параметрами своего движения (угол поворота, скорость вращения колес) [2].

3. Робот должен знать свое действительное местоположение, которое почти всегда отличается от хранящегося в бортовой системе.

### **1 Системы навигации**

В робототехнике выделяют три вида навигационных схем:

- *глобальная* – определение абсолютных координат устройства;
- *локальная* – определение координат устройства относительно базовой точке;
- *персональная* – позиционирование роботом частей своего тела и взаимодействие с близлежащими предметами, что актуально для устройств, снабженных манипуляторами.

Системы навигации классифицируются еще по одному признаку – они могут быть *пассивными* и *активными*. Пассивная система навигации подразумевает прием информации о собственных координатах и других характеристиках своего движения от внешних источников, а активная рассчитана на определение местоположения только своими силами. Как правило, все глобальные схемы навигации пассивные, локальные бывают и теми, и другими, а персональные схемы – всегда активные.

Простейшим вариантом навигационного устройства является *одометр*. Принцип работы одометра состоит в периодическом измерении скорости вращения колеса, и при известном его радиусе вычисляется пройденный путь. Но из-за ряда факторов, таких как неидеальная окружность колеса, прокручивание при движении, реальный пройденный путь отличается от рассчитанного, и данная ошибка постоянно накапливается.

В 50-е годы получила широкое распространение пассивная схема навигации по радиомаякам, а когда в 1957-м был запущен в космос советский "Спутник-1", сразу же был придуман простой способ измерения параметров его орбиты по изменению спектра передаваемого спутником сигнала. Эта идея легла в основу современных систем спутниковой навигации. Однако данную систему пока сложно использовать для навигации робота, т.к. она дает точность не более 10-15 м.

Аналогичная концепция для локальной системы навигации (при помощи ультразвуковых излучателей) заключается в размещении в зоне действий робота источников ультразвуковых сигналов, которые обрабатываются бортовым микропроцессором.

Также заслуживает внимания технология Motion Capture - метод анимации персонажей посредством захвата движений настоящих актеров. Суть метода заключается в том, что на актера одевается специальный костюм, входящий в комплект такой системы, к которому прикреплены пассивные датчики-маркеры (отражают только посланный на них свет, но сами не светятся). В таких системах свет (инфракрасное излучение) посылается на маркеры с установленных на камерах высокочастотных стробоскопов и, отразившись от маркеров, попадает обратно в объектив камеры, сообщая тем самым позицию маркера. Таким образом воссоздается 3D-модель актера. Данная технология получила широкое распространение в киноиндустрии. Однако использование данной технологии в навигации мобильных роботов пока не рентабельно из-за высокой стоимости оборудования, необходимого для реализации данной технологии.

Для построения образа пространства чаще всего применяется лазерный дальномер (ЛД) или ультразвуковой датчик (УД). При этом у каждой системы есть свои преимущества и недостатки. К примеру, при использовании ЛД можно получить информацию о среде толь-

ко в зоне прямой видимости луча, а при использовании УД имеет место большая задержка по времени, что не позволяет двигать работу достаточно быстро. Также стоит отметить влияние температуры окружающей среды на полученные данные от УД [3]. При этом обе системы требуют существенных вычислительных мощностей микропроцессора.

Целью данной работы является анализ ультразвуковых систем определения 2D положения мобильного робота для того, чтобы спроектировать эффективное, дешевое и надежное решения для задачи навигации.

## 2 Физика ультразвуковой диагностики

Ультразвуковое излучение — звуковые волны, имеющие частоту выше воспринимаемым человеческим ухом (более 20 000 Гц). Для получения изображения в ультразвуковой диагностике используется ультразвук, излучаемый в виде коротких импульсов (импульсный). Он генерируется при приложении к пьезоэлементу коротких электрических импульсов.

При прохождении ультразвукового сигнала через любую среду наблюдаться уменьшение его амплитуды и интенсивности (затухание). Затухание ультразвукового сигнала вызывается поглощением, отражением и рассеиванием.

Для того, чтобы правильно рассчитать расстояние между излучателем и объектом, необходимо знать время прохождения сигнала. Расстояние равно 1/2 произведения скорости ультразвука в среде на время между излучением и приемом отраженного сигнала (рисунок 1). Произведение скорости на время делится пополам, так как ультразвук проходит двойной путь (от излучателя до отражателя и назад).

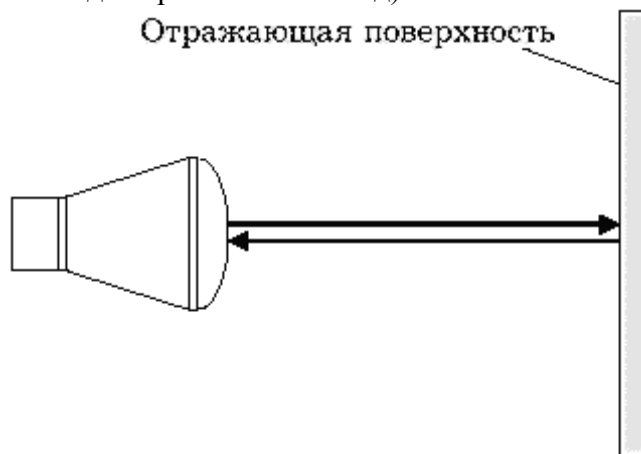


Рисунок 1 - Измерение расстояния с помощью ультразвука.

При этом важно отметить, что реальная скорость ультразвука в среде зависит от температуры и может быть больше или меньше усредненной скорости, на которую запрограммировано устройство. Для того, чтобы избежать ошибок, необходимо обеспечить термокомпенсацию, которая будет корректировать значение, записанное в программе микропроцессора.

Биологическое действие ультразвука и его безопасность для живых существ постоянно обсуждается в литературе. Знания о биологическом воздействии ультразвука базируются на изучении механизмов воздействия ультразвука, изучении эффекта воздействия ультразвука на клеточные культуры, экспериментальных исследованиях на растениях, животных.

Ультразвук может вызывать биологическое действие путем механических и тепловых воздействий. Затухание ультразвукового сигнала происходит из-за поглощения, т.е. превра-

щения энергии ультразвуковой волны в тепло. Учеными, занимающимися изучением воздействия ультразвука на живые организмы, было дано следующие заключение: "Никогда не сообщалось о подтвержденных биологических эффектах у пациентов или лиц, работающих на приборе, вызванных облучением ультразвуком, интенсивность которого типична для современных ультразвуковых диагностических установок".

### 3 Датчики ультразвукового излучения

Для получения ультразвука используются специальные преобразователи — трансдюсеры, которые превращают электрическую энергию в энергию ультразвука. Получение ультразвука базируется на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Суть эффекта состоит в том, что если к определенным материалам (пьезоэлектрикам) приложить электрическое напряжение, то произойдет изменение их формы (рисунок 2).

При отсутствии электрического тока пьезоэлемент возвращается к исходной форме, а при изменении полярности вновь произойдет изменение формы, но уже в обратном направлении. Если к пьезоэлементу приложить быстропеременный ток, то элемент начнет с высокой частотой сжиматься и расширяться (т.е. колебаться), генерируя ультразвуковое поле. Рабочая частота трансдюсера (резонансная частота) определяется отношением скорости распространения ультразвука в пьезоэлементе к удвоенной толщине этого пьезоэлемента. Детектирование отраженных сигналов базируется на прямом пьезоэлектрическом эффекте (рисунок 3).

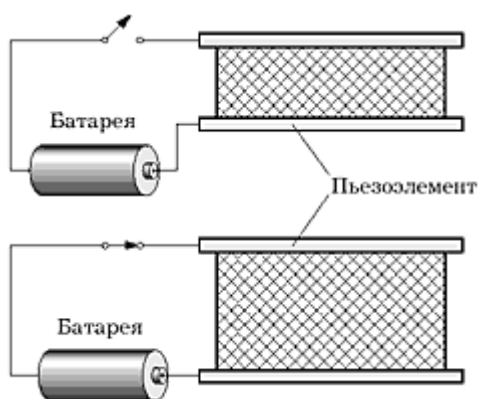


Рисунок 2 - Обратный пьезоэлектрический эффект.

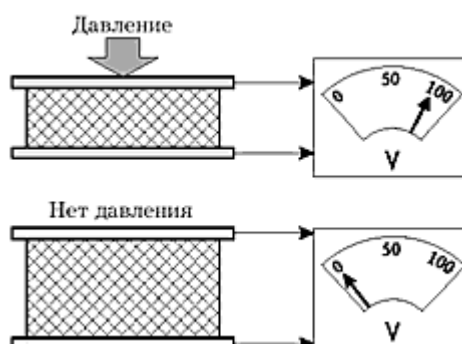


Рисунок 3 - Прямой пьезоэлектрический эффект.

Возвращающиеся сигналы вызывают колебания пьезоэлемента и появление на его гранях переменного электрического тока. В этом случае пьезоэлемент функционирует как ультразвуковой датчик. Обычно в ультразвуковых приборах для излучения и приема ультразвука используются одни и те же элементы. Устройства ультразвуковых датчиков отличаются друг от друга в деталях, однако их принципиальная схема в общем случае имеет одинаковый вид (рисунок 3).

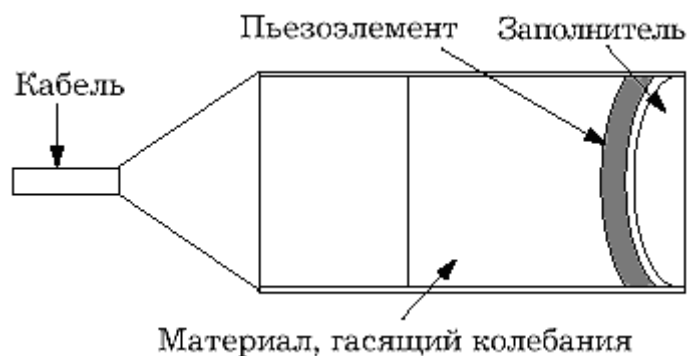


Рисунок 3 - Устройство ультразвукового датчика.

#### Дальномер ультразвуковой HC-SR04

Принцип работы: модуль дальномера использует ультразвук для определения расстояния до объектов в области видимости датчика. Используемая схема позволяет работать на расстояниях до 4-х метров. В дальномере применены пьезоэлектрические датчики (прием – передача), диаграмма направленности которых приведена на рисунке 4. Сенсор излучает короткий ультразвуковой импульс на частоте 40кГц, который отражается от объекта и принимается сенсором. Расстояние рассчитывается исходя из времени до получения эха и скорости звука в воздухе [4].

Другими словами, сенсор получает сигнал эха, и выдаёт расстояние, которое кодируется длительностью электрического сигнал на выходе датчика. Временная диаграмма показана на рисунке 6.

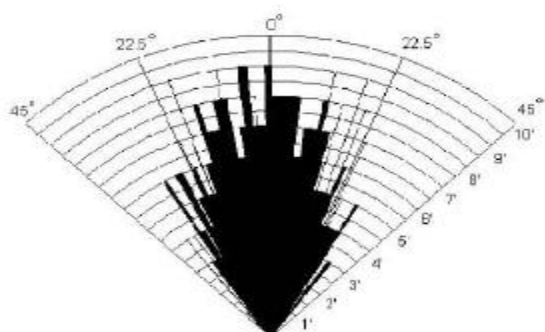


Рисунок 4 - Диаграмма направленности ультразвукового датчика HC-SR04



Рисунок 5 - Диаграмма направленности ультразвукового датчика HC-SR04

Точность датчика HC-SR04. По паспорту ультразвуковой дальномер HC-SR04 измеряет расстояние с разрешением ~3 мм в диапазоне от 3 до 400 см. На результат измерения влияет угол расположения отражающей поверхности. Если поверхность расположена перпендикулярно пути распространения ультразвукового сигнала датчика, то результат измерения будет точнее.

Размер отражающей поверхности и ее структура также оказывают влияние на точность измерений. В случае, если мы имеем маленький объект, то скорее всего ультразвуковой сигнал не будет отражаться.

Также большое значение имеет точность измерения длительности эхо сигнала. Наилучший результат можно получить при высокой тактовой частоте микроконтроллера и таймера. И наконец, скорость распространения звуковых колебаний в воздухе зависит от его температуры. В датчике этот нюанс не просчитывается автоматически, что требует дополнительной электронной и программной реализации для большей точности измерения.

#### 4 Структурная схема предлагаемой системы навигации

В ходе анализа существующих систем навигации было предложено решение для задачи проектирования надежной и дешевой ультразвуковой системы определения положения подвижного объекта с точностью, необходимой для корректного функционирования робота.

Структурная схема предлагаемой системы представлена на рисунке 6.

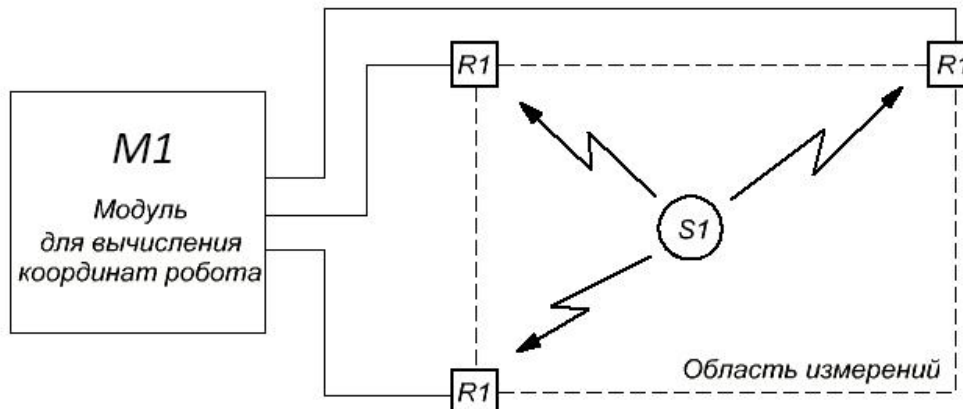


Рисунок 6 - Структурная схема системы определения положения робота

На структурной схеме представлены:

- R1, R2, R3 – ультразвуковые приемники-маяки, расположенные в углах области измерения;
- S1 – ультразвуковой передатчик, установленный на роботе;
- M1 - модуль для вычисления координат робота, к которому подключены маяки R1, R2, R3.

При функционировании данной системы можно выделить несколько определенных состояний, которые можно представить в виде машины состояний (рисунок 7).

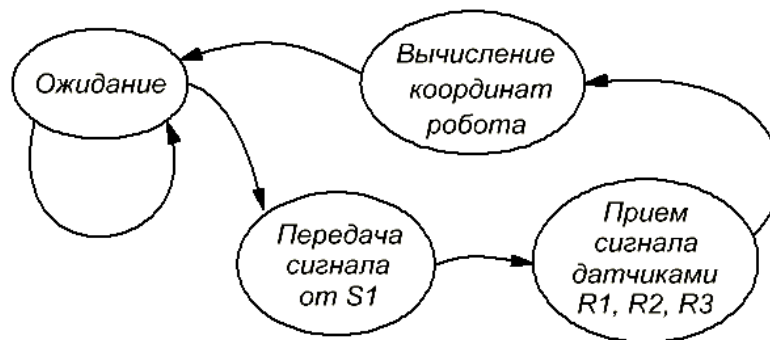


Рисунок 7 – Машина состояний системы определения положения робота

При включении система изначально находится в состоянии ожидания, затем в определенный момент времени S1 посылает ультразвуковой сигнал. После чего датчики R1, R2, R3 принимают сигнал от S1. В конечном состоянии модуль M1 для определения координат робота проводит вычисления и после система вновь переходит в режим ожидания.

#### 5 Геометрический расчет системы определения координат мобильного робота с параллельным режимом приема сигнала.

Рассматривается система навигации (рисунок 8), в которой принимают участие один ультразвуковой излучатель, находящийся на мобильном роботе (точка O с координатами (x, y)) и три маяка-приемника (точки A, B, C). В идею данного метода положен эффект разности во времени прихода ультразвукового сигнала на каждый из маяков.

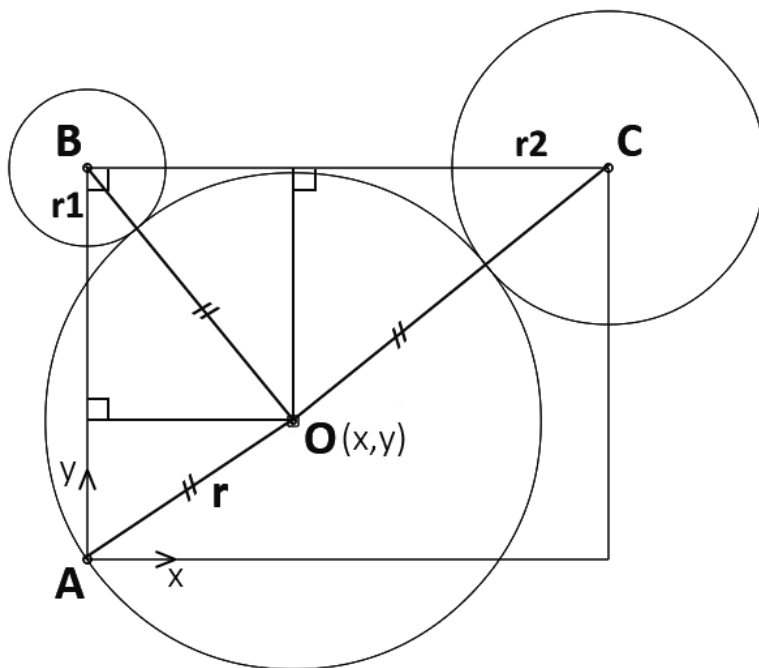


Рисунок 8 - Чертеж для геометрического расчета системы вычисления координат положения подвижного объекта с параллельным режимом приемом сигнала

В данном условии рассматривается ситуация, когда сигнал сначала пришел на маяк А, затем на остальные два с задержкой по времени. Окружности показывают совокупность точек сигнала в один момент времени. Необходимо найти значения координат т. О (x, y) из условия, что известны расстояния АВ и ВС,  $AB \perp BC$  и время задержки  $r_1$  и  $r_2$ .

Запишем систему исходя из равенства  $r$ :

$$\begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + (AB - y)^2} - r_1 \\ \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(BC - x)^2 + (AB - y)^2} - r_2 \end{cases} = \quad (1)$$

$$= \begin{cases} x^2 + y^2 + r_1^2 + 2 \cdot r_1 \sqrt{x^2 + y^2} = x^2 + y^2 + AB^2 - 2AB \cdot y \\ x^2 + y^2 + r_2^2 + 2 \cdot r_2 \sqrt{x^2 + y^2} = x^2 + y^2 + BC^2 + AB^2 - 2BC \cdot x - 2AB \cdot y \end{cases}$$

Из первого уравнения системы получаем:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \frac{AB^2 - 2AB \cdot y - r_1^2}{2 \cdot r_1} \quad (2)$$

Подставляем полученное выражение во второе уравнение системы (1):

$$r_2^2 + 2 \cdot r_2 \cdot \frac{AB^2 - 2AB \cdot y - r_1^2}{2 \cdot r_1} = BC^2 + AB^2 - 2BC \cdot x - 2AB \cdot y$$

Выражаем  $x$ :

$$x = \frac{BC^2 + AB^2 - 2AB \cdot y - r_2^2 - \frac{r_2}{r_1} \cdot (AB^2 - 2AB \cdot y - r_1^2)}{2BC} = \quad (3)$$

$$= \frac{BC^2 + AB^2 - r_2^2 - \frac{r_2}{r_1} \cdot (AB^2 - r_1^2)}{2BC} + y \cdot \frac{AB}{BC} \left( \frac{r_2}{r_1} - 1 \right)$$

Введем замену:

$$q1 = \frac{AB}{BC} \left( \frac{r2}{r1} - 1 \right), \quad q2 = \frac{BC^2 + AB^2 - r2^2 - \frac{r2}{r1} \cdot (AB^2 - r1^2)}{2BC}.$$

Тогда получаем:

$$x = q1 \cdot y + q2. \tag{4}$$

Далее подставим x вновь в первое уравнение системы:

$$\sqrt{(q1 \cdot y + q2)^2 + y^2} = \frac{AB^2 - r1^2}{2 \cdot r1} - y \frac{AB}{r1}$$

Введем замену:

$$z = \frac{AB^2 - r1^2}{2 \cdot r1}$$

Возведем уравнение в квадрат:

$$q1^2 y^2 + q2^2 + 2y \cdot q1 \cdot q2 + y^2 = z^2 + y^2 \left( \frac{AB}{r1} \right)^2 - 2y \cdot z \frac{AB}{r1}$$

$$y^2 \left( q1^2 + 1 - \left( \frac{AB}{r1} \right)^2 \right) + y \left( 2 \cdot q1 \cdot q2 + 2 \cdot z \frac{AB}{r1} \right) + q2^2 - z^2 = 0 \tag{5}$$

Введем замену:

$$a = \left( q1^2 + 1 - \left( \frac{AB}{r1} \right)^2 \right); \quad b = \left( 2 \cdot q1 \cdot q2 + 2 \cdot z \frac{AB}{r1} \right); \quad c = q2^2 - z^2$$

В итоге получаем:

$$a \cdot y^2 + b \cdot y + c = 0 \tag{6}$$

При проверке корней было выявлено, что только один из них соответствует реальным результатам, который вычисляется по формуле:

$$y = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{7}$$

В итоге получаем:

$$\begin{cases} y = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ x = q1 \cdot y + q2 \end{cases} \tag{8}$$

Преимущества данной системы навигации заключаются в том, что:

- ультразвуковой сигнал подается на датчики-маяки одновременно, а не последовательно, как в большинстве подобных систем [5], за счет чего время цикла определения координат сокращается в 3 раза;
- вся вычислительная мощность по расчету координат ложится на плечи модуля, который объединяет все маяки, и, как следствие, уменьшается нагрузка на микропроцессор мобильного робота.



При разработке вышеуказанной системы навигации появляется задача передачи вычисленных координат обратно роботу. Как вариант, для этого может быть использован радиочастотный канал, при этом необходимо обеспечить надежную передачу, возможно, с кодированием сигнала. Также стоит отметить, что сигнал с данными может принимать любое устройство в зоне действия маяков, которому известен данный тип передачи координат робота.

### **Заключение**

В ходе работы были рассмотрены популярные системы измерения пространственного положения мобильных роботов с акцентом на ультразвуковые системы навигации. Каждая из рассмотренных систем имеет свои преимущества и недостатки и используется в зависимости от запланированных целей. В процессе исследования была поставлена задача проектирования эффективной, дешевой и надежной системы 2D навигации.

Предложенная схема измерения координат мобильного робота с параллельным режимом приема сигнала представляет собой модификацию системы с последовательным опросом датчиков. В нашем случае ультразвуковой сигнал подается на датчики-маяки одновременно, за счет чего время цикла определения координат сокращается в 3 раза, а вся вычислительная мощность по расчету координат ложится на плечи модуля, который объединяет все маяки, и, как следствие, уменьшается нагрузка на микропроцессор мобильного робота. При геометрическом расчете была показана состоятельность данного метода и получены основные выражения для расчета координат объекта.

Дальнейшее развитие проекта требует решения ряда задач для повышения помехоустойчивости и точности рассмотренной системы, а также по передаче вычисленных координат обратно роботу. В перспективе имеет место переход навигации из 2D измерения в 3D-пространство.

### **Литература**

1 Расчет траектории движения мобильного робота в частной задаче перемещения объектов / Чистяков М.Г. // Сборник научных трудов. 13-ая Молодежная научно-техническая конференция "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы -2011". - Москва. 27 апреля 2011 г.- С.311-314.

2 Задача оптимизации системы автоматического управления: определение предельных режимов движения мобильного робота / Чистяков М.Г. // Сборник научных трудов. 14-ая Молодежная научно-техническая конференция "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы -2012". - Москва. 25 апреля 2012 г.- С.153-158.

3 Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля. М.: «Высшая школа», 1991 –285с.

4 Документация на ультразвуковой дальномер HC-SR04. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/HCSR04b.pdf> - Проверено 14.01.2014г.

5 Канцдалов Д.А., Капля В.И. Исследование ультразвуковых систем измерения пространственного положения подвижного объекта. Материалы IV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научный потенциал студенчества в XXI веке» Том первый. Естественные и технические науки. г. Ставрополь: СевКавГТУ, 2010. С. 48-52.