

## РАЗРАБОТКА ЭХО-МОДУЛЯ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ДВИЖУЩЕГОСЯ РОБОТА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ SMARTFUSION2

А. М. Позняк

Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь, *krucios@mail.ru*

В данной работе представлен способ создания модуля аппаратного ускорения для устройств, использующих ультразвуковой модуль, для измерения расстояния до препятствий, и сервопривод, для управления позицией ультразвукового модуля. Описываются его преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** ультразвуковой модуль; движущийся робот; SmartFusion2; система на кристалле; автоматическое огибание препятствий.

### Введение

Беспилотное наземное движущееся устройство (англ. *UGV – unmanned ground vehicle*) – это движущееся устройство, передвигающееся по земле без непосредственного участия человека. Беспилотные наземные движущиеся устройства применяются в местах, где человеку трудно, опасно или невозможно присутствовать. В общем случае такие устройства имеют множество датчиков для получения данных об окружающей их среде и могут управляться как человеком посредством удалённого управления, так и самостоятельно принимать решения о дальнейших действиях [1].

В проектах беспилотных наземных движущихся устройств разработчики сталкиваются с задачей определения расстояния до ближайшего препятствия в различных направлениях [2]. Для решения этой задачи в малогабаритных проектах используют ультразвуковой модуль (УЗ-модуль) и сервопривод, а для управления ими используют микроконтроллер [3]. Упрощенная блок схема таких систем представлена на рисунке 1.



Рис.1. Общая архитектура существующих систем

Управление периферийными устройствами осуществляется через систему прерываний микроконтроллера. В задачи микроконтроллера входит соблюдение протокола взаимодействия согласно спецификациям устройств [4, 5], считывание информации с периферийных устройств, обработка полученной информации и принятие решения, основываясь на полученной информации. Поскольку соблюдение протокола взаимодействия согласно спецификации и считывание информации – необходимые рутинные операции, для выполнения которых не требуется реализация сложных алгоритмов, то целесообразно освободить микроконтроллер от нужды выполнять эти действия. Сэкономленное время микроконтроллер сможет потратить на более глубокий анализ полученных данных. Для реализации такой системы необходимы модули аппаратного ускорения, для вынесения логики управления периферийными устройствами

и предоставления микроконтроллеру упрощенного интерфейса для получения измеренных данных.

### Общая структура Эхо-модуля

В данной работе для реализации модуля аппаратного ускорения используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Блок схема такой системы представлена на рисунке 2.

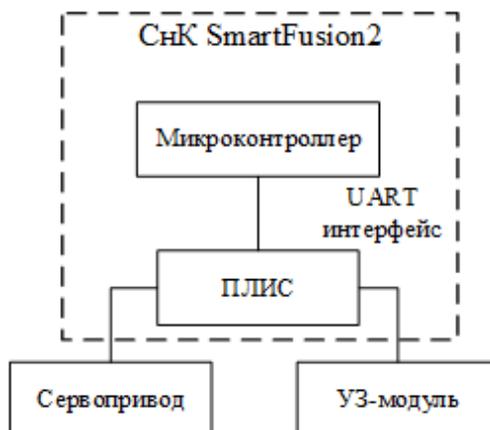


Рис. 2. Общая архитектура системы с Эхо-модулем

Отличительной особенностью SmartFusion2 является наличие микроконтроллера ARM Cortex M3 и ПЛИС на одном кристалле. Эта особенность позволяет реализовать Эхо-модуль и предоставить удобный интерфейс для работы с ним для микроконтроллера, расположенного на СнК.

Сервопривод способен отклоняться от главного направления на 90° влево и вправо, что делает невозможным измерение расстояния до препятствий позади Эхо-модуля. Также стоит отметить, что используемый ультразвуковой модуль (HC-SR04) способен различить препятствия на расстоянии от 0.1 м до 2 м [5]. Поверхность препятствия должна хорошо отражать ультразвуковые волны (ровные, твердые поверхности). Эти ограничения делают некоторые препятствия "невидимыми", поэтому нельзя полностью полагаться на результаты измерения данного модуля.

Далее будем называть совокупность всех модулей, представленных на рисунке 3 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Эхо-модулем. Таким образом, Эхо-модуль реализуется с использованием следующих компонентов:

- 1) Сервопривода TowerPro SG90 [4].
- 2) Ультразвукового модуля HC-SR04 [5].
- 3) Система на кристалле (СнК) SmartFusion2 [6].

Данный модуль разрабатывался на языке описания аппаратуры Verilog. Структурная схема модуля представлена на рисунке 3.

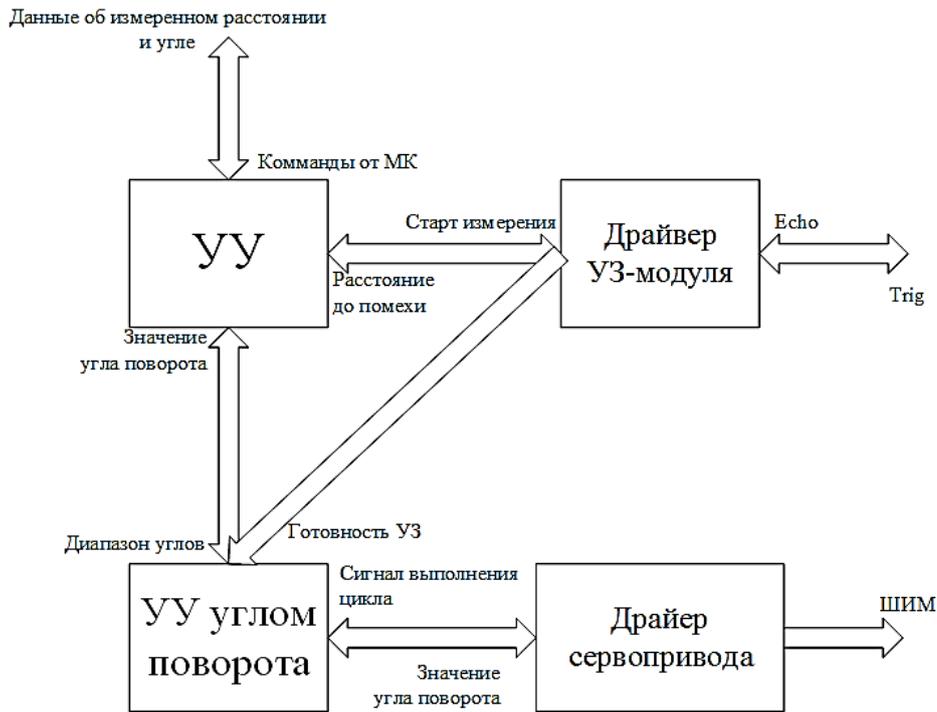


Рис. 3. Структурная схема Эхо-модуля. УУ – устройство управления. Echo, Trig – пины устройства HC-SR04. ШИМ – широтно-импульсная модуляция

Составными частями модуля являются:

- 1) Драйвер сервопривода.
- 2) Драйвер УЗ-модуля.
- 3) Блок управления.

### Драйвер сервопривода

Драйвер сервопривода – это часть Эхо-модуля, которая принимает на входе 8-ми битное значение угла, а на выходе выдает широтно-импульсно модулированный (ШИМ) сигнал, соответствующий заданному значению угла. Из спецификации устройства SG90 следует, что период управляющего ШИМ сигнала должен быть 20 мс, а ширина импульса от 1 мс до 2 мс [4]. Граф переходов разработанного конечного автомата представлен на рисунке 4.

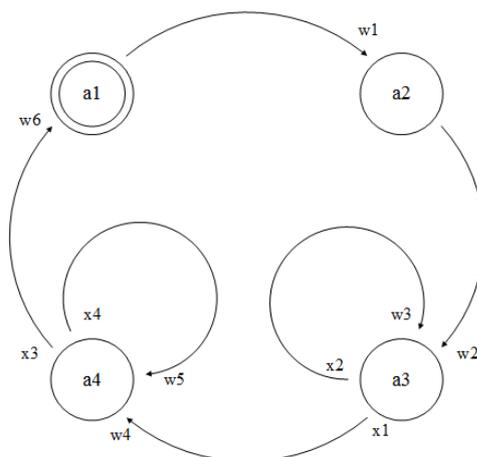


Рис. 4. Граф переходов конечного автомата драйвера сервопривода.

$A = \{a1, a2, a3, a4\}$  – множество состояний.  $X = \{x1, x2, x3, x4\}$  – входной алфавит.

$W = \{w1, w2, w3, w4\}$  – выходной алфавит

Начальным состоянием является состояние a1. Из начального состояния автомат всегда переходит в состояние a2, при этом выходы формируются следующим образом:

значение требуемого угла равно входному значению угла, сигнал завершения цикла равен 1, значение счётчика (под счётчиком здесь и далее подразумевается 32-х битный регистр, используемый для выдержки временных периодов) приравняется константе, равной количеству тактов при заданной частоте в 20-ти миллисекундном периоде.

Состояние a2 служит для вычисления количества тактов, требуемых для генерации импульса, соответствующего заданному углу. Из состояния a2 автомат безусловно переходит в состояние a3, при этом выходы формируются следующим образом: сигнал завершения цикла приравняется 0, количество тактов генерируемого импульса вычисляется по формуле, представленной ниже,

$$pulse\_width = CYCLES\_19\_MS - angle\_reg \cdot CYCLES\_PER\_ANGLE \quad (1)$$

где  $pulse\_width$  - количество тактов генерируемого импульса,  $CYCLES\_19\_MS$  – количество тактов для генерации 19 миллисекундного импульса  $angle\_reg$  – значение требуемого угла,  $CYCLES\_PER\_ANGLE$  – константа для конвертации значения угла в количество требуемых тактов для генерации соответствующего импульса. Поскольку из спецификации устройства SG90 следует, что данный сервопривод способен отклоняться на угол от 0° до 180°, а для представления угла в Эхо-модуле используется 8-ми битный регистр, то единица значения требуемого угла равняется 0.703125°.

Состояние a3 служит для генерации импульса, поэтому из этого состояния автомат переходит в состояние a4 только если значение счётчика равно  $pulse\_width$ , вычисленной по формуле (1). Выходы в состоянии a3 формируются следующим образом: сигнал для широтно-импульсной модуляции приравняется 1, значение счётчика уменьшается на 1.

В состоянии a4 автомат выдерживает требуемый период ШИМ сигнала для управления устройством SG90. Переход в состояние a1 осуществляется, когда счётчик принимает нулевое значение. Выходы принимают следующие значения: сигнал для широтно-импульсной модуляции приравняется 0, значение счётчика уменьшается на 1.

### Драйвер ультразвукового модуля

Драйвер ультразвукового модуля – это часть Эхо-модуля, которая принимает на входе запрос на измерение (управляющий сигнал в состоянии логической единицы). Выходы драйвера включают в себя сигнал готовности данных и 8-ми битное значение расстояния. Также драйвер имеет порты TRIG и ECHO, соответствующие пинам устройства HC-SR04. Для измерения расстояния пин TRIG удерживается в состоянии логической единицы в течении 10 мкс, затем по переднему фронту сигнала ECHO запускается таймер [5]. Останавливается таймер по заднему фронту сигнала ECHO.

В процессе измерения расстояния драйвер увеличивает внутренний 32-х битный регистр на значение, равное расстоянию в нанометрах, которое проходит звуковая волна за период тактового сигнала. Поскольку возвращаются только старшие 8 бит внутреннего регистра, то для правильной интерпретации итогового значения расстояния, его следует умножить на 16777216 ( $2^{24}$ ), чтобы получить расстояние в нанометрах. Граф переходов разработанного конечного автомата представлен на рисунке 5.

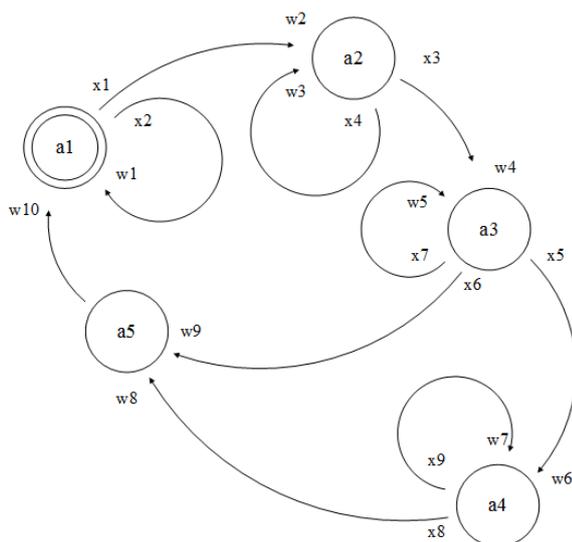


Рис. 5. Граф переходов конечного автомата драйвера УЗ-модуля.

$A = \{a1, a2, a3, a4, a5\}$  – множество состояний.

$X = \{x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9\}$  – входной алфавит.

$W = \{w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7, w8, w9, w10\}$  – выходной алфавит

Начальным состоянием является состояние a1. Автомат находится в состоянии a1 пока входной сигнал запроса измерения равен 0, в противном случае автомат переходит в состоянии a2. При переходе в состояние a2 выходы устанавливаются следующим образом: сигнал готовности измерения приравняется 0, в регистр таймаута загружается начальное значение, соответствующее количеству тактов в 10 миллисекундах, в регистр-счетчик загружается значение, соответствующее количеству тактов в 10 микросекундном периоде.

Состояние a2 используется для подачи импульса шириной в 10 микросекунд на пин TRIG устройства HC-SR04. Автомат находится в этом состоянии пока значение регистра-счетчика не будет равным 0, после чего переходит в состояние a3. Если значение регистра-счетчика не равно нулю, то выходной сигнал TRIG приравняется 1, а значение регистра-счетчика уменьшается на 1, иначе во внутренний регистр расстояния загружается 0 и пин TRIG устанавливается в 0.

В состоянии a3 автомат ожидает установления сигнала ECHO в 1. Переход в состояние a4 осуществляется, если сигнал ECHO равен 1, иначе если значение регистра таймаута равно 0, то автомат переходит в состояние a5. Если ни одно из двух вышеописанных условий не выполнилось, автомат остается в состоянии a3. При переходах в состояния a4 и a5 выходы формируются следующим образом: в регистр таймаута загружается значение на 1 меньше текущего. При переходе в состояние a5 выходы не назначаются.

В течении состояния a4 происходит измерение ширины ответного импульса от устройства HC-SR04. Этот импульс соответствует времени, которая звуковая волна затратила на перемещение от датчика до ближайшего препятствия и обратно. Из этого состояния автомат переходит в состояние a5, если ECHO равен 0 или регистр таймаута равен 0. Выходы назначаются следующим образом: для всех переходов их состояния a4: значение регистра таймаута уменьшается на 1, значение регистра расстояния увеличивается на константу  $NM\_PER\_CYCLE$ , вычисленную по следующей формуле

$$NM\_PER\_CYCLE = SOUND\_SPEED \cdot freq^{-1} \quad (2)$$

где  $freq$  – частота тактирования модуля,  $SOUND\_SPEED$  – скорость звука в воздушной среде в мм/с.

Состояние a5 служит для генерации пульса готовности данных о расстоянии до ближайшего препятствия. Это состояние имеет единственный безусловный переход в состояние a1, при котором выходной сигнал готовности измерения принимает значение 1.

### Блок управления

Немаловажным компонентом Эхо-модуля является блок управления. В задачи блока входят:

- 1) Управление сервоприводом.
- 2) Управление измерением расстояния с помощью HC-SR04.
- 3) Хранение и передача результатов.
- 4) Обработка входящих данных.

Эхо-модуль имеет 2 режима работы:

- 1) Автономный. В этом режиме модуль сам раз за разом измеряет расстояние до ближайшего препятствия и отправляет собранные данные через UART. Пользователь имеет возможность установить диапазон углов, в котором будут проводиться измерения расстояния. Со стороны микроконтроллера достаточно только считывать данные, передаваемые Эхо-модулем.
- 2) Ручное управление. Этот режим подразумевает установку требуемого угла и запрос измерения пользователем. Со стороны микроконтроллера требуется управляющая команда по установке угла, запрос измерения и только после этих действий на микроконтроллер будут отправлены данные о расстоянии до ближайшего препятствия в заданном направлении.

Связь блока управления с микроконтроллером осуществляется посредством блока приема\передачи по протоколу UART. Формат входящих и исходящих посылок представлен на рисунке 6.

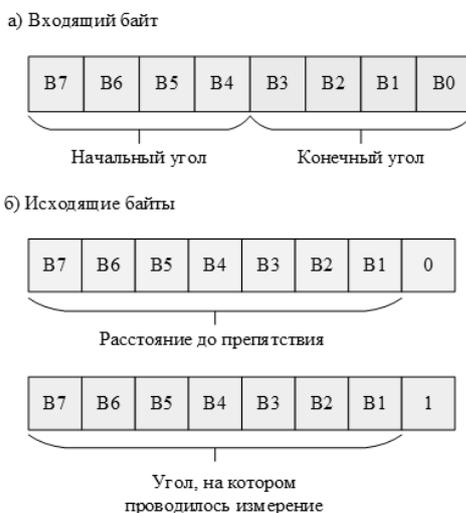


Рис. 6. а) формат входящих посылок. б) формат исходящих посылок. Биты байта нумеруются от В0 до В7, где В0 – младший бит

Входящие посылки – наборы по 8 бит. Выделяются 3 вида входящих посылок.

Первый – посылки управления диапазоном углов поворота сервопривода. Они устанавливают начальное и конечное значение угла поворота сервопривода. Подробный алгоритм движения сервопривода будет изложен ниже, но стоит отметить, что для хранения угла поворота сервопривода используется 8 бит и весь диапазон допустимых значений углов (от -90 до 90 градусов) спроецирован на диапазон всех значений 8-ми битной переменной. Так как в этом типе посылок для задания углов используются только 4 бита (вся посылка задаёт 2 угла), то младшие биты переменной каждого угла устанавливаются в 0. Другими словами, посылка задаёт старшие биты для начального и конечного значения углов. В случае, когда конец диапазона меньше, чем его начало, в

качестве конца будет использовано значение начала диапазона. Например, посылка 0x15 соответствует началу диапазона 0x5, концу 0x1 и в итоге начало и конец диапазона будут установлены в 0x5. В случае, когда начало диапазона совпадает с его концом, сервопривод будет удерживать заданный угол. Посылки этого типа обязательно должны иметь ненулевое значение конца диапазона (биты 7-4 образуют ненулевое значение) т.к. этот случай используется другим типом посылок. Следовательно, этим типом посылок невозможно установить сервопривод в положение, соответствующее значению 0x0.

Второй – посылки управления модулем. Данный тип посылок используется для запроса измерения расстояния (когда нет необходимости всё время измерять расстояния), управления режимом работы Эхо-модуля и установкой определенного значения угла поворота сервопривода.

Третий – посылки значения угла поворота. Должны отправляться только после посылки установки определенного значения угла поворота. Все 8 бит посылки определяют 8-ми битное значение угла сервопривода.

Исходящей посылкой является пара байтов, где первый байт содержит значение расстояние, полученное от драйвера ультразвукового модуля, а второй байт содержит значения угла поворота, на котором было проведено измерение. Однако, для предоставления возможности микроконтроллеру однозначно идентифицировать тип исходящего байта, эти байты снабжаются битом, указывающим тип байта. Этот метод уменьшает точность в 2 раза. Граф переходов разработанного конечного автомата представлен на рисунке 7.

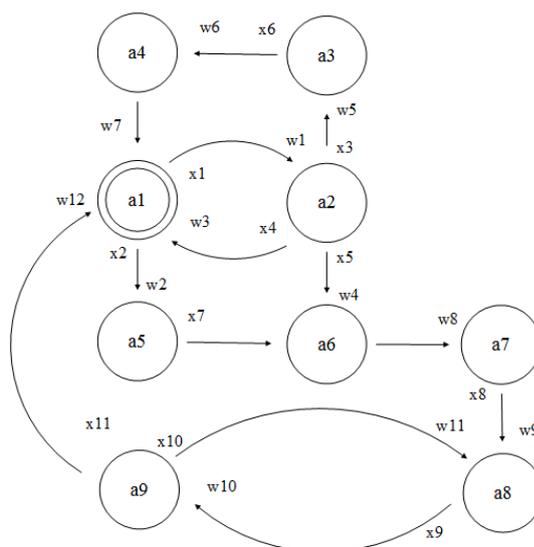


Рис 7. Граф переходов конечного автомата блока управления.

$A = \{a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9\}$  – множество состояний.

$X = \{x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, x11\}$  – входной алфавит.

$W = \{w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7, w8, w9, w10, w11, w12\}$  – выходной алфавит

Начальным состоянием является состояние a1. Если сигнал готовности входных данных равен 1, то автомат переходит в состояние a2, иначе автомат переходит в состояние a5. Выходы назначаются одинаковым образом для всех переходов: сигналы считывания входных данных и записи выходных данных устанавливаются в 1 (означает, что блок управления не принимает и не передает данные на этом такте).

Состояние a2 используется для приема и декодирования данных. Считываемые данные содержат 8 бит. Если старшие 6 бит считываемых данных имеют значение 0, то автомат переходит в состояние a3, если старшие 6 бит имеют значение 2, то автомат переходит в состояние a6, иначе автомат переходит в состояние a1. Выходы формируются следующим образом: сигнал считывания входных данных устанавливается в 0 и, если старшие 6 бит считываемых данных имеют значение 1, то в регистр режима работы

записывается младший бит, иначе если старшие 4 бита считываемых данных не равны 0, то в регистр конечного угла передаются старшие 4 бита считываемых данных, а в регистр начального угла передаются младшие 4 бита считываемых данных.

В состоянии а3 автомат ожидает установления сигнала готовности считываемых данных. Переход в состояние а4 осуществляется если сигнал готовности входных данных равен 1. Выходному сигналу считывания входных данных устанавливается в 1.

Автомат считывает входные данные и записывает их в регистры начального и конечного угла в состоянии а4. Безусловный переход осуществляется в состояние а1. В регистр начального и конечного угла записываются считываемые данные, сигнал считывания входных данных устанавливается в 0.

Состояние а5 используется автоматом для ожидания сигнала завершения цикла сервопривода. Автомат переходит в состояние а6 при условии, что сигнал завершения цикла сервопривода равен 1. Выходы в этом состоянии не назначаются.

В состоянии а6 автомат посылает запрос на измерения расстояния драйверу ультразвукового модуля. Из этого состояния автомат безусловно переходит в состояние а7. Выходному сигналу запроса на измерение расстояния назначается значение 1.

Автомат дожидается сигнала готовности измерения от драйвера УЗ модуля в состоянии а7. Переходит в состояние а8 если сигнал готовности измерения равен 1. Сигнал запроса измерения расстояния устанавливается в 0, в регистр результата измерения записывается текущее значение измеренного расстояния.

Состояние а8 автомат формирует выходные данные и ожидает сигнала готовности передачи данных. Автомат переходит в состояние а9 если сигнал готовности передачи данных равен 1. Выходы назначаются следующим образом: сигнал передачи данных устанавливается в 1 (передача не осуществляется) и, если триггер типа данных имеет значение 0, то в регистр выходных данных загружаются старшие 7 бит регистра измеренного расстояния на позиции старших 7-ми бит, а младший бит устанавливается в 0, если же триггер типа данных имеет значение 1, то в регистр выходных данных загружаются значения 7-ми старших бит текущего угла сервопривода на позиции 7-ми старших бит, а младший бит устанавливается в 1.

В состоянии а9 блок управления осуществляет передачу данных. Если значение младшего бита регистра выходных данных имеет значение 0, то переход осуществляется в состояние а8, иначе в состояние а1. В триггер типа данных записывается противоположное значение, а сигнал передачи данных устанавливается в 0 (передача осуществляется).

### **Сравнение и тестирование**

Для проведения тестирования были разработаны тестовая прошивка и verilog-описание Эхо-модуля. Verilog-описание разрабатывалось и тестировалось с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) Libero SoC компании Microsemi, также с помощью этой САПР программировалась СнК. Разработка и отладка прошивки для микроконтроллера, с помощью которой осуществлялось управление Эхо-модулем, проводились в среде разработки SoftConsole 4.0 компании Microsemi. Все системы тактировались сигналом с частотой 50 МГц.

Отладочная плата с СнК SmartFusion 2 была связана с персональным компьютером (ПК) через bluetooth и принимала от него управляющие сигналы. Микроконтроллер обрабатывал управляющие сигналы от ПК и посылал их Эхо-модулю. Также в задачи микроконтроллера входили: считывание измеренных данных о расстоянии и отправка этих данных на ПК.

Для сравнения систем с Эхо-модулем и без него было достаточно разработать 2 тестовые прошивки, каждая из которых в течении заданного времени проводила измерения расстояния до ближайшего препятствия с использованием системы прерываний микроконтроллера, а в свободное от обработки прерываний время увеличивала значение переменной. Оценивались количество проведенных измерений и

значение переменной, которая показывала, как много времени микроконтроллер потратил на задачи, не связанные с измерением расстояния. Результаты тестов представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Сравнение производительности систем измерения, использующих УЗ модуль

	Эхо-модуль		Микроконтроллер	
	Значение	Измерений	Значение	Измерений
0.1 сек	237507	5	118731	4
1 сек	2379334	46	1189366	49
10 сек	23797750	455	11895790	499

Стоит отметить, что Эхо-модуль за отведенный промежуток времени производит меньшее количество измерений, однако требует меньшего количества инструкций процессора для инициализации и считывания измеренных данных. В итоге, по результатам тестирования, Эхо-модуль использует в 2 раза меньше процессорного времени по сравнению с системой измерения расстояния до ближайшего препятствия, использующей только микроконтроллер.

### Заключение

Было разработано verilog-описание Эхо-модуля. Это описание было проверено с использованием симуляции и на реальной СпК. Также Эхо-модуль был встроен в проект беспилотного наземного движущегося устройства, где подтвердил свою работоспособность.

- 1) Преимущества использования Эхо-модуля:
- 2) Снижение нагрузки на микроконтроллер в 2 раза.
- 3) Возможность быстрой интеграции в другие системы благодаря использованию интерфейса UART.
- 4) Ускорение процесса разработки системы путем исключения необходимости реализовывать логику управления сервоприводом и ультразвуковым модулем.

Однако использование Эхо-модуля также накладывает ряд ограничений:

- 1) Необходимость наличия ПЛИС или реализации модуля на кристалле.
- 2) Требования к тактовой частоте модуля.
- 3) Ограничения, связанные с движением сервопривода.

В качестве дальнейшего развития темы можно рассматривать вынесение логики обработки измеренных расстояний в дополнительный модуль. Этот подход актуален, так как для распознавания препятствия и принятия решения микроконтроллер тратит время, которое может быть потрачено на более детальное планирование.

### Библиографические ссылки

1. Wikipedia | Unmanned ground vehicle [Электронный ресурс]. - 2017. - Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_ground\\_vehicle/](http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_ground_vehicle/) - Дата доступа: 11.03.2017.
2. I. Bugaje, A. Z. Loko, A. U. Ismail, Anugwom Samuel "Design and Implementation of an Unmanned Ground Vehicle for Fumigation Purpose", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 30(9), 440-443 December 2015. ISSN:2231-5381.
3. Krutika Basinge, Sejal Nagpure, Punam Shinde, Prof.Y.K.Sharma "Unmanned Ground Vehicle Using Ultrasonic Ranging module", International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT), Vol. 7(2), 908-909, 2016. ISSN:0975-9646.
4. SG-90 TowerPro | Micro Servo [Электронный ресурс]. - 2017. - Режим доступа: <http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf> - Дата доступа: 11.03.2017.
5. HC-SR04 | Ultrasonic Ranging Module [Электронный ресурс]. - 2017. - Режим доступа: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf> - Дата доступа: 11.03.2017.
6. SmartFusion2 | Actel [Электронный ресурс]. - 2017. - Режим доступа: [http://www.keil.com/dd/docs/datashts/actel/m2sxxx/smartfusion2\\_ds.pdf](http://www.keil.com/dd/docs/datashts/actel/m2sxxx/smartfusion2_ds.pdf) - Дата доступа: 11.03.2017.