

DOI: 10.18721/JCSTCS.12302
УДК 534.44

УСТРОЙСТВО ОБНАРУЖЕНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Е.В. Богатиков, А.Н. Шебанов, К.Э. Ангарита Лорес

Воронежский государственный университет,
Воронеж, Российская Федерация

Разработано устройство, регистрирующее ультразвук с частотой до 100 кГц, преобразующее его в звуковые колебания в реальном времени с задержкой менее 2 мс и воспроизводящее полученные звуковые колебания. Изменение частоты сигнала производится при помощи быстрого преобразования Фурье и выделения доминирующей частоты в режиме реального времени на микроконтроллере с ядром ARM Cortex M3. Сохранение огибающей импульсов с временным разрешением до 1,2 мс и хорошая чувствительность используемых МЭМС-микрофонов в ультразвуковой области позволяют применять устройство для обнаружения и классификации сигналов эхолокации животных. Низкая стоимость комплектующих и их доступность дают возможность эксплуатировать устройство в бытовой сфере для контроля работоспособности устройств, излучающих ультразвук, и для контроля за отсутствием ультразвуковых шумов, неблагоприятно влияющих на самочувствие человека при длительном воздействии.

Ключевые слова: ультразвук, микрофон, МЭМС, микроконтроллер, БПФ.

Ссылка при цитировании: Богатиков Е.В., Шебанов А.Н., Ангарита Лорес К.Э. Устройство обнаружения и цифровой обработки ультразвуковых сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 3. С. 25–36. DOI: 10.18721/JCSTCS.12302

ULTRASOUND DETECTION AND DIGITAL PROCESSING DEVICE

E.V. Bogatikov, A.N. Shebanov, C.E. Angarita Lores

Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation

The device has been developed that registers ultrasound with a frequency of up to 100 kHz, which converts it into sound in real time with a delay of less than 2 ms and reproduces the received sound. The signal frequency is changed using the fast Fourier transform and the selection of the dominant frequency in real time on a microcontroller with an ARM Cortex M3 core. The preservation of the pulse envelope with a time resolution of up to 1.2 ms and the good sensitivity of the used MEMS microphones in the ultrasound region make it possible to use the device for detecting and classifying animals' echolocation signals. The low cost of the used components and

their accessibility make it possible to use the device in the domestic sphere to monitor the performance of devices that emit ultrasound, and to monitor the absence of ultrasonic noise, which can adversely affect a person's well-being during prolonged exposure.

Keywords: ultrasound, microphone, MEMS, microcontroller, FFT.

Citation: Bogatkov E.V., Shebanov A.N., Angarita Lores C.E. Ultrasound detection and digital processing device. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 3, Pp. 25–36. DOI: 10.18721/JCSTCS.12302

Введение

Задача детектирования низкочастотного ультразвука (с частотой до 100 кГц) встречается при контроле качества работы различных устройств, оценке условий труда на рабочих местах [1–6], изучении животных, использующих ультразвук для общения или ориентации в пространстве [7–13].

Наиболее важные параметры ультразвукового детектора определяются, прежде всего, режимом детектирования (гетеродинирование, деление частоты, запись с последующим замедленным воспроизведением) и типом используемого микрофона. От режима детектирования зависит способность сохранять характеристики сигнала, такие как форма и частота следования ультразвуковых импульсов, характеристическая частота и параметры частотной модуляции. Худшие результаты имеет режим гетеродинирования, наилучшие – режим записи с последующим воспроизведением, однако он менее удобен из-за невозможности работы в режиме реального времени и большого объема данных. Режим деления частоты позволяет обеспечить компромисс между удобством работы и объемом извлекаемой информации. Тип используемого микрофона (электретный, МЭМС) определяет предельную частоту (обычно не менее 100 кГц) и чувствительность детектора.

Широкое распространение получили детекторы летучих мышей (bat detectors), которые применяются научно-исследовательскими и образовательными учреждениями, экологическими организациями и натуралистами-любителями. Стоимость специализированных приборов для детектирования и исследования эхолокации животных од-

ного из лидеров рынка – фирмы Pettersson Elektronik – составляет от 185 долл. США (простейший ультразвуковой детектор гетеродинного типа D100 с предельной частотой 120 кГц) до 4375 долл. США (профессиональный ультразвуковой детектор D1000X с предельной частотой 235 кГц, работающий в гетеродинном режиме, режиме деления частоты и режиме записи сигнала). Наряду с профессиональными приборами существуют любительские [14]. Они работают в режиме гетеродинирования из-за простоты его реализации. В таких детекторах происходит перемножающее смещение входного ультразвукового сигнала (детектируемого простым электретным микрофоном) с сигналом, генерируемым опорным генератором. Полученная разностная частота выводится на динамик. Подобные разработки просты, но имеют очень ограниченную сферу применения из-за того, что детектор определяет только факт наличия ультразвука, но не способен производить никакой параметризации сигнала.

В то же время существуют задачи, в которых полезна количественная информация о характере ультразвукового сигнала, но не требуется профессиональное качество оборудования. Такие задачи возникают, например, на начальных этапах научных исследований, в учебных задачах, а также в бытовой сфере.

Непрерывное совершенствование элементной базы (например, появление новых типов микрофонов), а также быстрый рост вычислительных возможностей микроконтроллеров, позволяют реализовать ультразвуковой детектор, работающий в ре-

жиме деления частоты, имеющий достаточно высокую чувствительность и широкие возможности в классификации ультразвуковых сигналов при низкой стоимости.

Наша цель — подбор элементной базы и разработка ультразвукового детектора, работающего в режиме деления частоты, а также поиск оптимальных параметров цифровой обработки ультразвукового сигнала с использованием современных массовых бюджетных микроконтроллеров.

Общая схема устройства

Общая схема разработанного устройства приведена на рис. 1. В качестве сенсора ультразвуковых колебаний используется МЭМС-микрофон фирмы Knowles, принадлежащий к серии SiSonic [15]. Поликремниевая диафрагма данных микрофонов имеет однородно высокую чувствительность в широком диапазоне частот (в спецификации приведены данные до 80 кГц) и позволяет

применять их в ультразвуковых приложениях [16, 17]. При этом микрофоны серии SiSonic ориентированы на массовое применение и имеют низкую стоимость (менее 1 долл. США). При испытании устройства использовались модели микрофонов SPU0410LR5H и SPU0410HR5H. Микрофон SPU0410HR5H имеет верхнее (т. е. в крышке корпуса) расположение акустического отверстия и меньшее количество контактов, что обеспечивает его преимущество по сравнению с SPU0410LR5H в простоте монтажа. Как видно из рис. 2 а, микрофон SPU0410LR5H требует при монтаже точного позиционирования из-за нижнего (т. е. на стороне контактных площадок) расположения акустического отверстия, однако в его спецификации присутствуют данные о чувствительности в ультразвуковой области частот, в отличие от модели SPU0410HR5H. В качестве контрольного сенсора использовался обычный электретный микрофон ECM-60А.

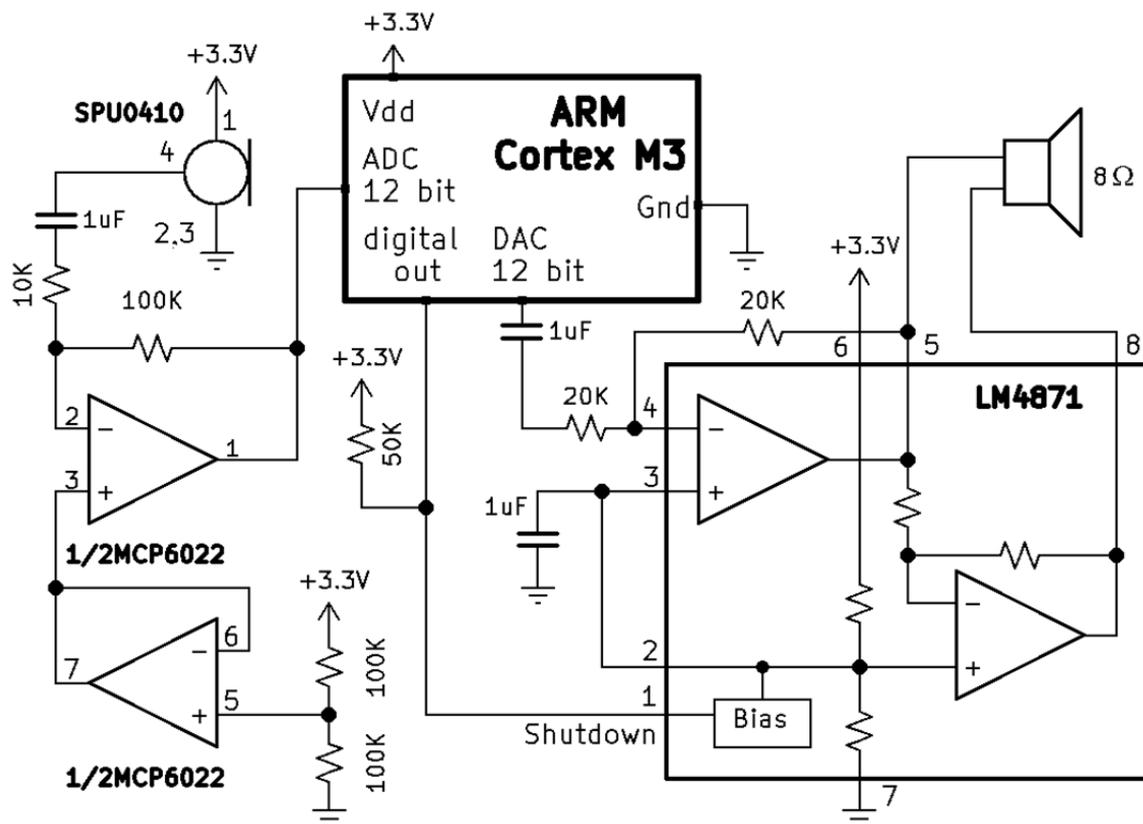


Рис. 1. Общая схема детектора ультразвука
Fig. 1. General scheme of the ultrasound detector

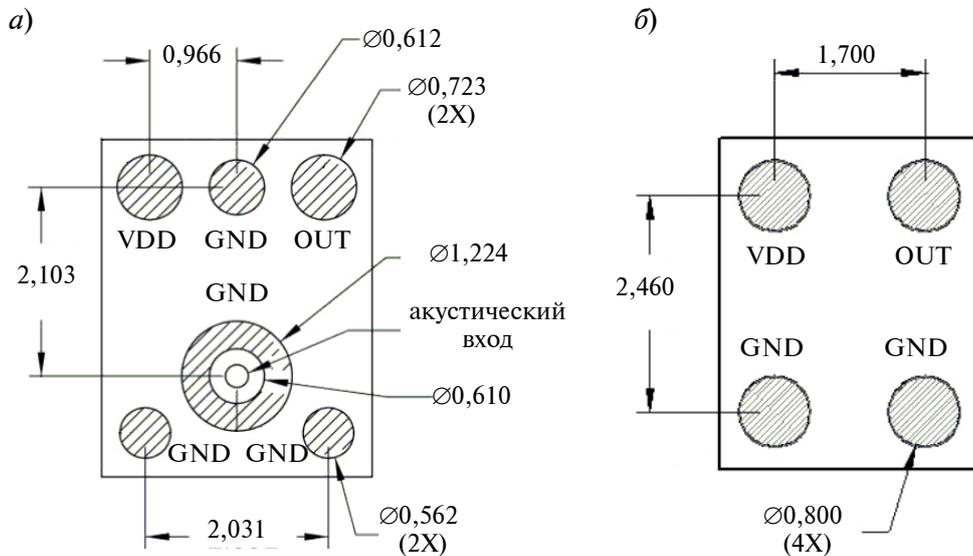


Рис. 2. Цоколевка микрофонов: *a* – SPU0410LR5H; *б* – SPU0410HR5H
 Fig. 2. Microphones pinouts: *a* – SPU0410LR5H; *б* – SPU0410HR5H

Благодаря высокой чувствительности используемых МЭМС-микрофонов возможно использование простейшего инвертирующего усилителя на операционном усилителе (ОУ), имеющем достаточно широкую полосу пропускания. Например, на сдвоенном ОУ МСР6022, ширина полосы пропускания которого при единичном усилении составляет 10 МГц. Данный усилитель имеет низкую спектральную плотность напряжения шума на входе, равную 8,7 нВ/√Гц, а наличие двух операционных усилителей в составе МСР6022 позволяет также реализовать эффективный источник опорного напряжения.

Усиленный сигнал подается на вход АЦП в составе микроконтроллера на базе ядра Cortex-M3, обеспечивающего требуемое быстродействие. Это может быть микроконтроллер Atmel SAM3X8E, входящий в состав платформы Arduino Due (если требуется быстрое прототипирование), или STM32F103C8, имеющий большое количество доступных отладочных плат (если требуется оптимальное отношение цена/качество), или К1986ВЕ92QI, разработанный отечественной компанией АО «ПКК Миландр» (если решаются, например, задачи импортозамещения) [18–20].

В любом случае, микроконтроллер имеет АЦП со скоростью выборки не менее 512 тыс. преобразований в секунду, что вполне достаточно для поставленной задачи. Также данные микроконтроллеры имеют в своем составе ЦАП, позволяющий выводить обработанные данные на усилитель мощности.

В качестве усилителя мощности используется микросхема LM4871, обладающая рядом преимуществ: минимальное количество внешних элементов, низкое напряжение питания (от 2 до 5,5 В), работа на низкоомную нагрузку (до 8 Ом при мощности 1,5 Вт), наличие энергосберегающего режима с током покоя 0,6 мкА.

Алгоритм работы устройства

Общий алгоритм работы микроконтроллера, обеспечивающий цифровую обработку входного сигнала, представлен на рис. 3. При накоплении очередных N отсчетов входной сигнал подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ) [21, 22]. В найденном спектре мощности для области частот выше 20 кГц находится доминирующая частота с максимальной амплитудой. Вычисленные значения частоты и амплитуды используются при генерации выходного

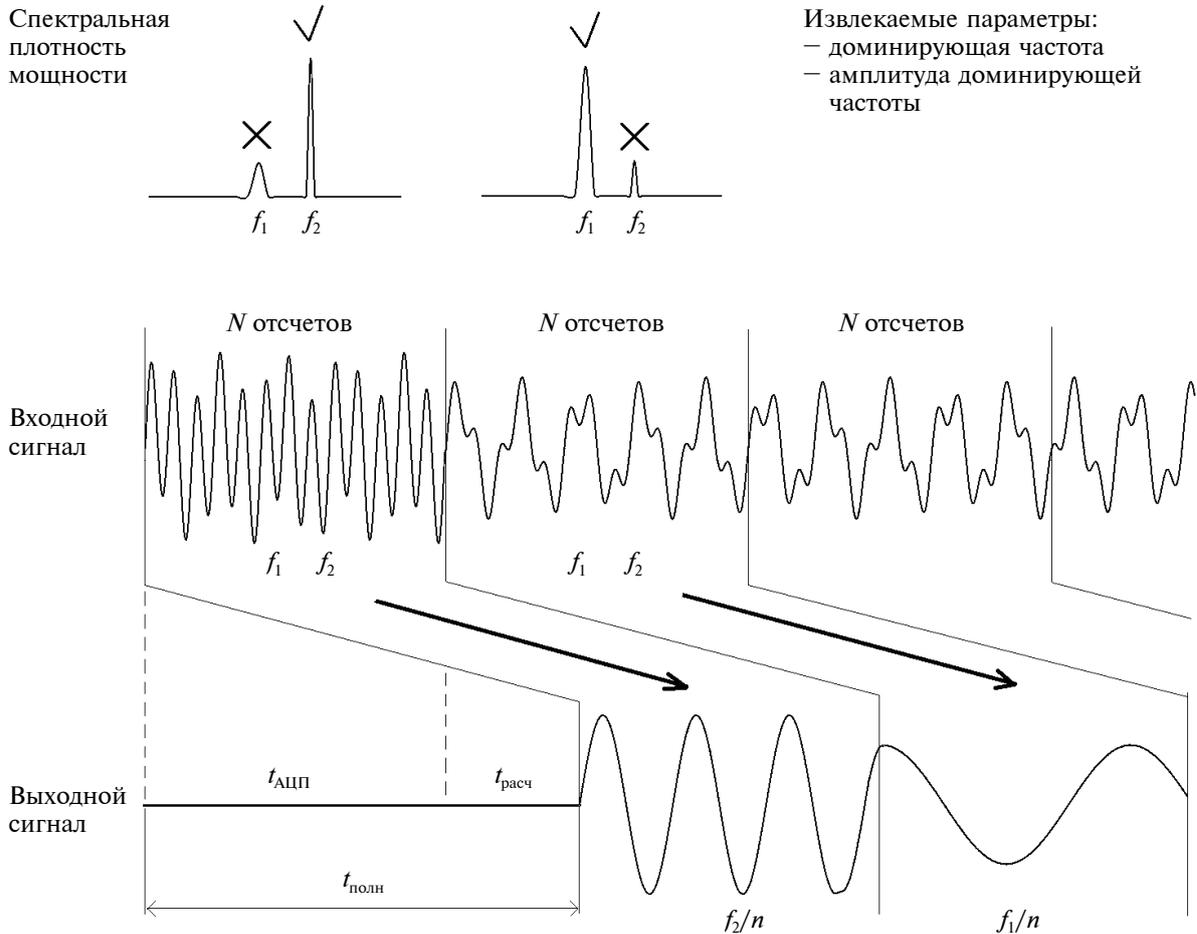


Рис. 3. Общий алгоритм цифровой обработки сигнала в детекторе ультразвука

Fig. 3. General algorithm for digital signal processing in the ultrasound detector

сигнала. Частота выходного сигнала предварительно делится на заданный множитель (далее используются множитель 10). Выходной сигнал генерируется на основе таблично заданной синусоиды. В моменты изменения частоты выходного сигнала обеспечивается сшивка фазы и амплитуды сигнала для устранения звуковых искажений. Более подробное описание алгоритма приведено ниже.

Алгоритм

Переменные и параметры: CurAmp (текущая амплитуда), DestAmp (требуемая амплитуда), Freq (требуемая выходная частота), SinCache (таблица значений одного периода синуса), SinIndex (текущий индекс в таблице значений синуса), PhaseDiff (приращение фазы), PhaseDiv (коэффици-

ент изменения фазы, зависящий от DACdiv), OutSignal (амплитуда выходного сигнала в кодах ЦАП), AmpStep (шаг изменения амплитуды), DACdiv (коэффициент деления частоты), SinCount (размер таблицы значений синуса), NoiseLvl (минимальная амплитуда входного сигнала, не считающаяся шумом).

Инициализация:

1. SinCount \leftarrow 100.
2. Цикл по i от 0 до SinCount - 1 с шагом 1.
3. SinCache[i] \leftarrow 2047.0 \times sin($2 \times \text{PI} \times i / \text{SinCount}$) // Заполнение целочисленной таблицы SinCache значениями, приведенными к диапазону, соответствующему диапазону изменения кодов 12-битного ЦАП.
4. Конец цикла

5. $\text{AmpStep} \leftarrow 1$; $\text{DACdiv} \leftarrow 10$
6. Выполнить подпрограмму «Настройка АЦП».
7. Выполнить подпрограмму «Настройка ЦАП».
8. Выполнить подпрограмму «Настройка таймеров».
9. Настройка обработчика прерываний «Вывод данных в ЦАП».

Основная программа (в бесконечном цикле):

1. Если буфер заполнен, то
2. Выполнить FFT.
3. Найти частоту с максимальной амплитудой.
4. Обновить значения Freq и DestAmp .
5. Если $\text{DestAmp} < \text{NoiseLvl}$, то
6. Установить значение DestAmp равным 0
7. **Конец если**
8. Если есть данные в буфере COM-порта, то
9. Читать из буфера новые значения AmpStep и DACdiv .

Обработчик прерываний «Вывод данных в ЦАП»:

1. $\text{PhaseDiff} \leftarrow \text{PhaseDiff} + \text{Freq} \times \text{SinCount}$ // расчет приращения фазы с учетом предыдущего приращения, не учтенного в изменении индекса таблицы значений синуса.
2. $\text{SinIndex} \leftarrow (\text{SinIndex} + \text{PhaseDiff} / \text{PhaseDiv}) \% \text{SinCount}$ // здесь и далее «%» – остаток от деления нацело.
3. $\text{PhaseDiff} \leftarrow \text{PhaseDiff} \% \text{PhaseDiv}$ // расчет приращения фазы, не учтенного при изменении SinIndex (т. к. реальное изменение индекса всегда целочисленное, при том что изменение фазы соответствует дробному изменению индекса).
4. $\text{OutSignal} \leftarrow 2047 + ((\text{SinCache} [\text{SinIndex}] \times \text{CurAmp}) \gg 11)$
5. Установить новое значение амплитуды ЦАП.
6. Если $\text{CurAmp} > \text{DestAmp}$, то
7. $\text{CurAmp} \leftarrow \text{CurAmp} - \text{AmpStep}$
8. Если $\text{CurAmp} < \text{NoiseLvl}$ и $\text{DestAmp} = 0$, то
9. Выключить усилитель мощности.
10. **Иначе, Если** $\text{CurAmp} < \text{DestAmp}$

11. Включить усилитель мощности.
12. $\text{CurAmp} \leftarrow \text{CurAmp} + \text{AmpStep}$
13. **Конец Если**

Приведенный алгоритм был реализован для микроконтроллера семейства SAM3X8E (в составе платформы Arduino Due). Использовалась библиотечная реализация БПФ (библиотека SplitRadixRealP).

Испытание устройства

Для испытания разработанного устройства в качестве тестового источника ультразвуковых сигналов взяли ультразвуковой дальномер HC-SR04, генерирующий импульсы с частотой ~ 40 кГц и управляемый Arduino Uno [23]. При испытании периодичность следования ультразвуковых импульсов составляла 5 мс, расстояние между источником ультразвука и микрофоном составляла 1 м, уровень усиления выходного сигнала микрофона был равен 20 дБ.

Для сравнения чувствительности микрофонов (совместно с предусилителем) в ультразвуковой области измерили зависимость от расстояния отклика устройства на сигнал с частотой 40 кГц, генерируемый HC-SR04. Измерение при различных расстояниях производилось для того, чтобы избежать возможного влияния ревербераций. Полученные результаты приведены на рис. 4. Аппроксимирующие кривые соответствуют зависимости $S = S_0 / d$, где S – отклик предусилителя в мВ, S_0 – отклик предусилителя на расстоянии 1 м, d – расстояние между источником ультразвука и микрофоном. Анализ полученной зависимости показывает, что для частоты 40 кГц чувствительность микрофона SPU0410HR5H превышает чувствительность микрофона ЕСМ-60А на 20 дБ, а чувствительность микрофона SPU0410LR5H превышает чувствительность микрофона ЕСМ-60А на 35,5 дБ. Причина различной чувствительности МЭМС-микрофонов, изготовленных по одинаковой технологии SiSonic, заключается, видимо, в расположении входного акустического отверстия. Как показано в работе [16], при верхнем расположении акустического отверстия резонансная частота сенсора

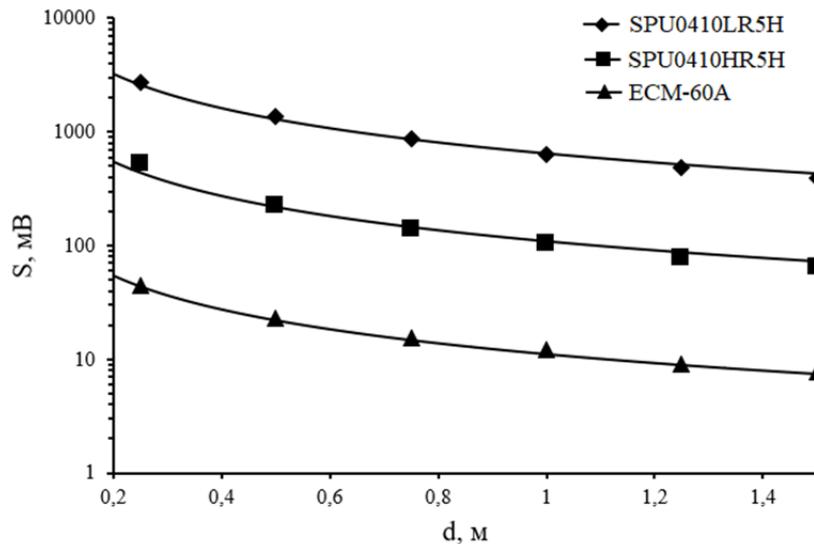


Рис. 4. Зависимость отклика предусилителя от расстояния между источником ультразвука (частота 40 кГц) и микрофоном

Fig. 4. Dependence of the preamplifier response on the distance between the ultrasound source (frequency 40 kHz) and the microphone

Таблица 1

Параметры используемых микрофонов

Table 1

Parameters of microphones used

Параметр	Микрофон		
	SPU0410 LR5H	SPU0410 HR5H	ECM-60A
Уровень чувствительности, дБВ/Па ($f = 1$ кГц)	-38 ± 1	-42 ± 1	-36 ± 1
Уровень чувствительности, дБВ/Па ($f = 40$ кГц)	-40 ± 1	$-55,5 \pm 1$	$-75,5 \pm 1$
Чувствительность, мВ/Па ($f = 40$ кГц)	88	15	1,5
Уровень собственных шумов, дБ ($f = 1$ кГц)	31	35	34
Собственный шум, мкВ	80	80	140
Динамический диапазон, дБ ($f = 1$ кГц)	87	87	86

сдвигается в область более низких частот по сравнению с микрофонами, имеющими ниже расположение акустического отверстия. Это приводит к ухудшению равномерности частотного отклика в диапазоне звуковых частот и существенному снижению чувствительности в ультразвуковой области.

Сравнение параметров используемых микрофонов приведено в табл. 1. Уровень чувствительности для $f = 1$ кГц и $f = 40$ кГц рассчитан на основании проведенных измерений, остальные параметры определены на

основании спецификаций [15]. Необходимо отметить, что собственный шум всех используемых микрофонов существенно превышает шум операционного усилителя ($\sim 2,5$ мкВ для диапазона частот 20–80 кГц), которым можно пренебречь. При этом разрешение по напряжению 12-битного АЦП используемого микроконтроллера, равное 805 мкВ, соответствует уровню шума на выходе микрофонного усилителя при уровне усиления 20 дБ. Таким образом, использование дополнительного АЦП с более высоким разрешением не требуется.

Таблица 2

**Время выполнения операций
микроконтроллером семейства SAM3X8E**

Table 2

**The execution time of operations
by the microcontroller of the SAM3X8E family**

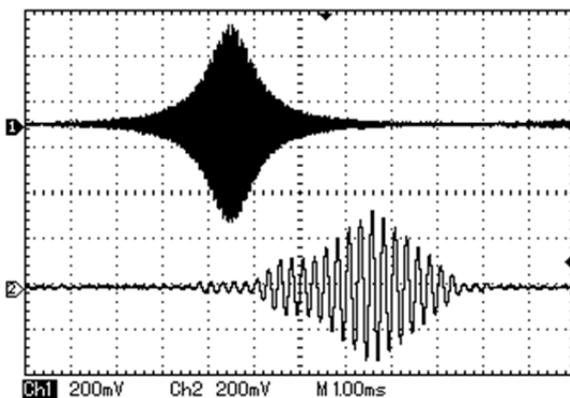
N	$t_{\text{расч}}$, мс	$t_{\text{АЦП}}$ при $f_d=200$ кГц, мс	$t_{\text{полн}}$, мс
64	0,31	0,32	0,63
128	0,58	0,64	1,22
256	1,10	1,28	2,38
512	2,28	2,56	4,84
1024	5,05	5,12	10,17

Для определения оптимальной частоты дискретизации при накоплении данных, а также допустимой длины выборки N определялась производительность разработанной прошивки микроконтроллера. Условием стабильной работы алгоритма без потери входных данных является $t_{\text{расч}} < t_{\text{АЦП}}$, где $t_{\text{расч}}$ – время выполнения БПФ и других вспомогательных операций, $t_{\text{АЦП}}$ – время накопления N отсчетов. Для используемой библиотеки вычисления БПФ данное усло-

вие выполняется только при частоте дискретизации f_d , не превышающей 200 кГц (табл. 2). Время расчета хорошо соответствует зависимости $t_{\text{расч}} = C \cdot \log_2(N)$, однако при $N < 128$ существенный вклад во время расчета вносят вспомогательные операции, что приводит к росту множителя C . При $N = 64$ $t_{\text{расч}} \approx t_{\text{АЦП}}$ и использование такой длины выборки нежелательно из-за возможной потери данных.

Сравнение точности воспроизведения формы сигнала при $N = 128$ и $N = 256$ показывает, что предпочтительной является длина выборки $N = 128$, обеспечивающая стабильность вычислений без потери данных, точность в детектировании доминирующей частоты и амплитуды, а также позволяющая быстрее реагировать на изменение амплитуды входного сигнала по сравнению с $N = 256$. Осциллограммы тестирования алгоритма приведены на рис. 5 (входной сигнал подавался непосредственно на вход АЦП с выхода функционального генератора). Пример работы алгоритма в условиях частотной модуляции сигнала приведен на рис. 6.

a)



b)

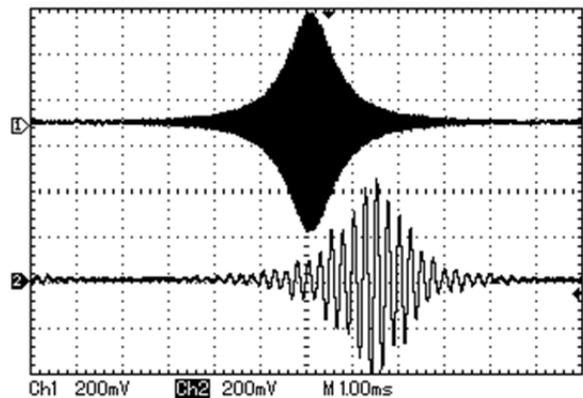


Рис. 5. Тестирование воспроизводимости амплитудной модуляции сигнала при делении частоты для количества отсчетов БПФ $N = 256$ (a) и $N = 128$ (б); на осциллограммах сверху – входной сигнал, снизу – выходной сигнал

Fig. 5. Testing the reproducibility of the amplitude modulation of the signal when the frequency is divided for the number of FFT samples $N = 256$ (a) and $N = 128$ (b); on oscillograms from above – input signal, from below – output signal

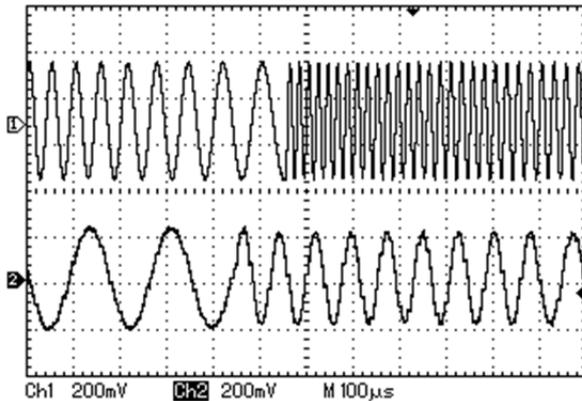


Рис. 6. Тестирование воспроизводимости частотной модуляции сигнала; коэффициент деления частоты $n = 3$, количество отсчетов БПФ $N = 128$

Fig. 6. Testing the reproducibility of the frequency modulation of the signal; the frequency division factor $n = 3$, the number of FFT samples $N = 128$

Результаты испытания готового устройства (собранного согласно схеме на рис. 1) приведены на рис. 7. В качестве источника ультразвука использован дальномер HC-SR04. Видно достаточно хорошее воспроизведение огибающей входного сигнала, а также высокая чувствительность, позволяющая воспроизводить не только первичный, но и двукратно отраженный сигнал. Запаздывание выходного сигнала относительно входного соответствует данным из табл. 2. Скачки амплитуды и фазы на границах выборок отсутствуют.

Заключение

Полученные значения чувствительности ультразвукового детектора позволяют использовать устройство как при оценке загрязнения окружающего пространства ультразвуком (согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 предельно допустимый уровень низкочастотного ультразвука составляет 75 дБ), так и для детектирования эхолокации животных (уровень сигналов эхолокации летучих мышей достигает 120–130 дБ [8]), причем функция сохранения формы сигнала с разрешением по

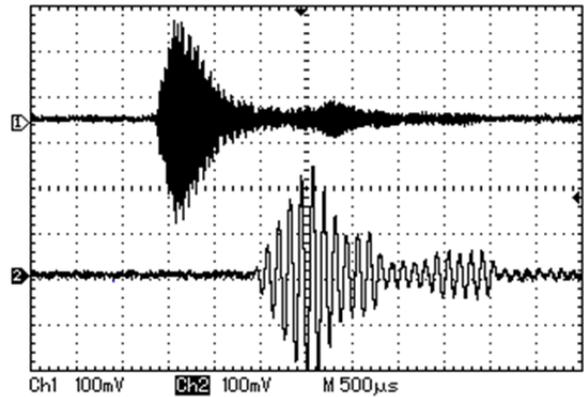


Рис. 7. Результаты испытания готового устройства, микрофон SPU0410LR5H, $f_d = 200$ кГц, $N = 128$, $n = 5$

Fig. 7. Test results of the completed device, microphone SPU0410LR5H, $f_d = 200$ kHz, $N = 128$, $n = 5$

времени $\sim 1,2$ мс позволяет применять прибор и в исследовательских целях (длительность импульсов эхолокации летучих мышей составляет от 3 до 65 мс [9] при частоте от 16 до 80 кГц с вариацией частоты от единиц до десятков процентов).

Анализ стоимости и функциональности разработанного устройства показывает, что при стоимости комплектующих ~ 15 долл. США, сопоставимой со стоимостью любительских разработок, действующих по принципу гетеродинамирования (стоимость компонентов ~ 5 долл. США), функциональность устройства сопоставима с профессиональными устройствами начального уровня стоимостью ~ 200 –400 долл. США.

Низкая стоимость разработанного устройства позволяет расширить область его применения, например, за счет бытовой сферы (контроль работоспособности ультразвуковых отпугивателей грызунов и насекомых или других приборов, использующих ультразвук). При необходимости функционал устройства может быть расширен сохранением оцифровываемых данных на внешние устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Howard C.Q., Hansen C.H., Zander A.C.** Review of current recommendations for airborne ultrasound exposure limits // Proc. of ACOUSTICS 2005 Conf. Pp. 341–343.
2. **Lenhardt M.L.** Airborne ultrasonic standards for hearing protection // Proc. of 9th Internat. Congress on Noise as a Public Health Problem. 2008. Pp. 842–848.
3. **Paxton B., Harvie-Clark B.** Public exposure to very high frequency sound and ultrasound: do we know the risks? // Proc. of the Institute of Acoustics. 2016. Vol. 38. No. 1. Pp. 400–407.
4. **Fletcher M.D., Jones S.L., White P.R., Dolder C.N., Lineton B., Leighton T.G.** Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2554–2564. DOI: 10.1121/1.5063817
5. **Duck F., Leighton T.** Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2490–2500. DOI: 10.1121/1.5063578
6. **Radosz J., Pleban D.** Ultrasonic noise measurements in the work environment // The J. of the Acoustical Society of America. 2018. Vol. 144. No. 4. Pp. 2532–2538. DOI: 10.1121/1.5063812
7. **Hopp S.L., Owren M.J., Evans C.S.** Animal acoustic communication: sound analysis and research methods. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 421 p. DOI: 10.1007/978-3-642-76220-8
8. **Surlykke A., Kalko E.K.V.** Echolocating bats cry out loud to detect their prey // PLoS ONE. 2008. Vol. 3. No. 4. Pp. 1–10. DOI: 10.1371/journal.pone.0002036
9. **MacSwiney M.C., Clarke F.M., Paul A.R.** What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat assemblages // J. of Applied Ecology. 2008. Vol. 45. Pp. 1364–1371. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01531.x
10. **Adler M.J., Newman C.M., Sutter C.L., Ebeling C., Ribe C., West P.** System and method for detecting bats and their impact on wind facilities // U.S. Patent 8,379,486. 2013.
11. **Kerbiriou C., Bas Y., Viol I., Lorrilliere R., Mougnot J., Julien J.F.** Bat pass duration measurement: an indirect measure of distance of detection // Diversity. 2019. Vol. 11. No. 3. DOI: 10.3390/d11030047
12. **Chesmore E.D.** Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals // Applied Acoustics. 2001. Vol. 62. Pp. 1359–1374. DOI: 10.1016/S0003-682X(01)00009-3
13. **Ahlen I., Baagoe H.J.** Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe: experiences from field identification, surveys and monitoring // Acta Chiropterologica. 1999. Vol. 1. No. 2. Pp. 137–150.
14. **Berber J.** Build a bat detector // Nuts and Volts. 2001. No. 6. Pp. 30–34.
15. **SiSonic Surface Mount MEMS Microphones** // URL: <https://www.knowles.com/subdepartment/dpt-microphones/subdpt-sisonic-surface-mount-mems> (Дата обращения: 10.07.2019).
16. **Grigor'ev D.M., Godovitsyn I.V., Amelichev V.V., Generalov S.S.** Finite element simulation of frequency response of MEMS-microphone // Russian Microelectronics. 2018. Vol. 47. No. 3. Pp. 211–216.
17. **Сысоева С.** МЭМС-микрофоны // Компоненты и технологии. 2010. Т. 108. № 7. С. 72–78.
18. **Abdrakhmanov V.K., Salikhov R.B., Vazhdaev K.V.** Development of a sound recognition system using STM32 microcontrollers for monitoring the state of biological objects // Proc. of the 14th Internat. Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. 2018. Vol. 8. Pp. 170–173.
19. **Шумилин С.** Новая серия отечественных 32-разрядных высокопроизводительных микроконтроллеров семейства 1986 на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3 // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 60–64.
20. **Володин В.Д., Шаронов А.А., Мозжегов К.С.** Отечественная элементная база. Отладочные комплекты // Master's Journal. 2016. № 2. С. 166–175.
21. **Karpis O.** FFT on ARM-based low-power microcontrollers // Internat. J. of Engineering Research and Development. 2013. Vol. 6. № 9. Pp. 67–72.
22. **Roscoe A., Sklaschus T., Oldroyd G., Blair S.M., Burt G.** Measurement of 40 power system harmonics in real-time on an economical ARM Cortex-M3 platform // Electronics Letters. 2013. Vol. 49. No. 23. Pp. 1475–1476. DOI: 10.1049/el.2013.0299
23. **Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V.** Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // J. of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 032189. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189

Статья поступила в редакцию 09.07.2019.

REFERENCES

1. Howard C.Q., Hansen C.H., Zander A.C. Review of current recommendations for airborne ultrasound exposure limits. *Proceedings of ACOUSTICS 2005 Conference*, 2005, Pp. 341–343.
2. Lenhardt M.L. Airborne ultrasonic standards for hearing protection. *Proceedings of 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem*, 2008, Pp. 842–848.
3. Paxton B., Harvie-Clark B. Public exposure to very high frequency sound and ultrasound: do we know the risks? *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 2016, Vol. 38, No. 1, Pp. 400–407.
4. Fletcher M.D., Jones S.L., White P.R., Dolder C.N., Lineton B., Leighton T.G. Public exposure to ultrasound and very high-frequency sound in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2554–2564. DOI: 10.1121/1.5063817
5. Duck F., Leighton T. Frequency bands for ultrasound, suitable for the consideration of its health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2490–2500. DOI: 10.1121/1.5063578
6. Radosz J., Pleban D. Ultrasonic noise measurements in the work environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, Vol. 144, No. 4, Pp. 2532–2538. DOI: 10.1121/1.5063812
7. Hopp S.L., Owren M.J., Evans C.S. *Animal acoustic communication: Sound analysis and research methods*. Berlin: Springer-Verlag, 1998, 421 p. DOI: 10.1007/978-3-642-76220-8
8. Surlykke A., Kalko E.K.V. Echolocating bats cry out loud to detect their prey. *PLoS ONE*, 2008, Vol. 3, No. 4, Pp. 1–10. DOI: 10.1371/journal.pone.0002036
9. MacSwiney M.C., Clarke F.M., Paul A.R. What you see is not what you get: the role of ultrasonic detectors in increasing inventory completeness in Neotropical bat assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 2008, Vol. 45, Pp. 1364–1371. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2008.01531.x
10. Adler M.J., Newman C.M., Sutter C.L., Ebeling C., Ribe C., West P. System and method for detecting bats and their impact on wind facilities. *U.S. Patent 8,379,486*, 2013.
11. Kerbiriou C., Bas Y., Viol I., Lorrilliere R., Mougnot J., Julien J.F. Bat pass duration measurement: an indirect measure of distance of detection. *Diversity*, 2019, Vol. 11, No. 3. DOI: 10.3390/d11030047
12. Chesmore E.D. Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals. *Applied Acoustics*, 2001, Vol. 62, Pp. 1359–1374. DOI: 10.1016/S0003-682X(01)00009-3
13. Ahlen I., Baagoe H.J. Use of ultrasound detectors for bat studies in Europe: experiences from field identification, surveys and monitoring. *Acta Chiropterologica*, 1999, Vol. 1, No. 2, Pp. 137–150.
14. Berber J. Build a bat detector. *Nuts and Volts*, 2001, No. 6, Pp. 30–34.
15. SiSonic Surface Mount MEMS Microphones, Available: <https://www.knowles.com/subdepartment/dpt-microphones/subdpt-sisonic-surface-mount-mems> (Accessed: 10.07.2019).
16. Grigor'ev D.M., Godovitsyn I.V., Amelichev V.V., Generalov S.S. Finite element simulation of frequency response of MEMS-microphone. *Russian Microelectronics*, 2018, Vol. 47, No. 3, Pp. 211–216.
17. Sysoyeva S. MEMS-mikrofony [MEMS-microphones]. *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2010, Vol. 108, No. 7, Pp. 72–78. (rus)
18. Abdrakhmanov V.K., Salikhov R.B., Vazhdaev K.V. Development of a sound recognition system using STM32 microcontrollers for monitoring the state of biological objects. *Proceedings of the 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering*, 2018, Vol. 8, Pp. 170–173.
19. Shumilin S. Novaya seriya otechestvennykh 32-razryadnykh vysokoproizvoditelnykh mikrokontrollerov semeystva 1986 na baze protsessornogo yadra ARM Cortex-M3 [New series of Russian 32-bit high-performance microcontrollers from the 1986 family based on the ARM Cortex-M3 processor core]. *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2008, No. 10, Pp. 60–64. (rus)
20. Volodin V.D., Sharonov A.A., Mozhgorov K.S. Otechestvennaya elementnaya baza. Otladochnyye komplekty [Russian element base. Debug kits]. *Master's Journal*, 2016, No. 2, Pp. 166–175.
21. Karpis O. FFT on ARM-based low-power microcontrollers. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2013, Vol. 6, No. 9, Pp. 67–72.
22. Roscoe A., Sklaschus T., Oldroyd G., Blair S.M., Burt G. Measurement of 40 power system harmonics in real-time on an economical ARM Cortex-M3 platform. *Electronics Letters*, 2013, Vol. 49, No. 23, Pp. 1475–1476. DOI: 10.1049/el.2013.0299

23. **Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V.** Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, P. 032189. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189

Received 09.07.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БОГАТИКОВ Евгений Васильевич

BOGATIKOV Evgenii V.

E-mail: evbogatikov@yandex.ru

ШЕБАНОВ Александр Николаевич

SHEBANOV Alexandr N.

E-mail: anshebanov@hotmail.com

АНГАРИТА Лорес Карлос Эдуардо

ANGARITA Lores Carlos Eduardo

E-mail: loresruizlozano@gmail.com