

УДК 621.396

*Е.В. Васильев, М.И. Тимофеев***АКУСТИЧЕСКИЙ ЛОКАТОР С ВЫСОКИМ
РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ДАЛЬНОСТИ**

Представлены результаты разработки и испытаний акустического локатора, выполненного на основе прямого цифрового синтезатора частоты. Показано, что разработанный способ построения акустического локатора обеспечивает улучшение разрешения по дальности до препятствия по сравнению с традиционными акустическими локаторами на основе пьезоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: *внутриимпульсная линейная частотная манипуляция, пьезоэлектрический преобразователь, прямой цифровой синтезатор частоты, акустический локатор, дальномер.*

Введение. Использование радиосигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) является традиционным подходом к построению радиолокаторов различного назначения. Известны два основных способа использования ЛЧМ в радиолокации: частотная модуляция по пилообразному закону непрерывного зондирующего радиосигнала и использование в качестве зондирующего сигнала радиоимпульсов с высокочастотным заполнением, частота которого изменяется по линейному закону. Первый из названных способов использования ЛЧМ применяется в основном в радиолокационных дальномерах, альтиметрах или уровнемерах [1, 2], на основе второго способа строят радиолокационные станции самого различного гражданского и военного назначения [3].

Однако в ряде случаев использование радиолокаторов для обнаружения целей, объектов наблюдения или препятствий движению является нецелесообразным или невозможным. В первых, речь идет о таких «бюджетных» устройствах, как различные варианты устройств охранной сигнализации для помещений или обнаружителей препятствий для автомобилей (парктроник), где применение радиолокаторов экономически нецелесообразно; во-вторых – о гидролокаторах, геолокаторах и дефектоскопах, предназначенных для исследования горных пород или искусственных материалов, характеризующихся значительным поглощением радиоволн. В таких случаях применяется акустическая локация в звуковом или ультразвуковом диапазонах волн.

Одним из основных параметров акустиче-

ского локатора (иногда называемого сонаром – sonar) является разрешающая способность по дальности – возможность разделения на приемном устройстве откликов (эхо-сигналов) от двух или нескольких близко расположенных отражателей, что обеспечивает возможность отдельного измерения расстояния до каждого из них. Для промышленно выпускаемых сонаров с пьезоэлектрическим преобразователем в качестве приемоизлучающего акустического элемента значение этого параметра может составлять десятки сантиметров в воздухе, что в ряде практических случаев неприемлемо.

В качестве примера можно привести представленные в технической документации [4] результаты испытания промышленно выпускаемого сонара фирмы MaxBotix с пьезоэлектрическим преобразователем. На рисунке 1 показана огибающая принимаемых сигналов от нескольких отражателей разной конфигурации, расположенных на расстояниях 66 см, 111 см, 189 см и 704 см. Из рисунка ясно, что разрешающая способность по отношению к нескольким отражателям будет составлять около 25 см. Проведенные нами собственные испытания сонара MaxBotix типа MaxSonar MB7076, предоставленного научно-производственной фирмой ООО «Шибболет», г. Рязань, подтверждают приведенные выше данные.

Цель работы – разработка и исследование возможности практической реализации акустического локатора, обладающего повышенным разрешением по дальности по сравнению с традиционно применяемыми сонарами на основе пьезоэлектрических преобразователей.

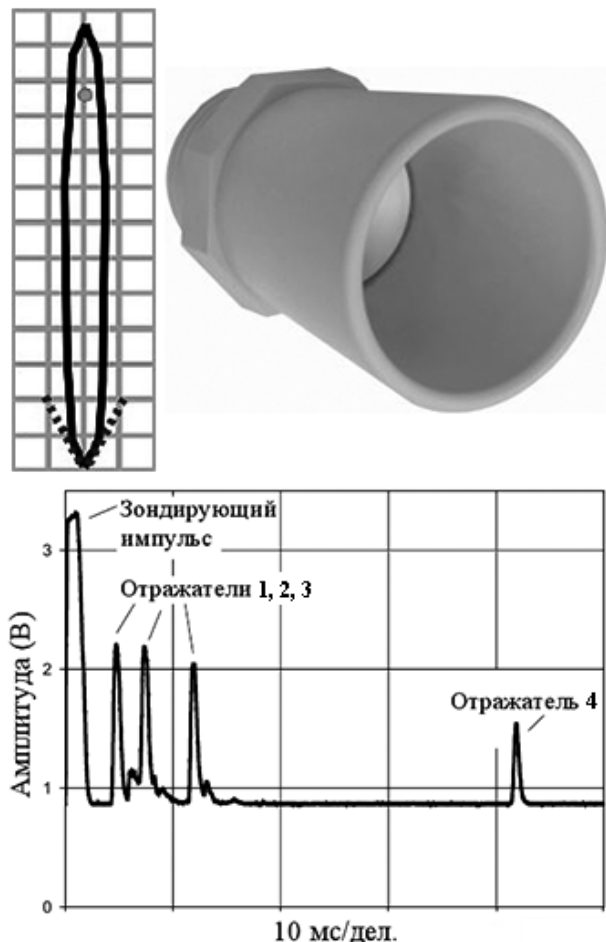


Рисунок 1 – Внешний вид, диаграмма направленности сонара с пьезоэлектрическим преобразователем MB7076, огибающая аналогового сигнала отражения от нескольких объектов на расстояниях: 1 – 66 см; 2 – 111 см; 3 – 189 см; 4 – 704 см

Краткие теоретические сведения. Упомянутый выше традиционный подход к построению акустических локаторов основан на использовании возбуждаемых периодическими электрическими импульсами пьезоэлектрических излучателей [5]. Пьезоэлектрический преобразователь представляет собой [6] диск, шайбу или стержень из сегнетоэлектрического материала, на противоположные плоскости которого нанесены металлические обкладки, служащие электродами. Такой преобразователь обладает как прямым, так и обратным пьезоэлектрическим эффектом, благодаря чему используется в качестве микрофона в паузах между излучением зондирующих акустических импульсов. Необходимо отметить, что пьезоэлектрические преобразователи обладают резонансными свойствами, что приводит к образованию длительного колебательного процесса при импульсном его возбуждении. Обычно для акустической локации используются пьезоэлектрические преобразователи частотного диапазона 40...250 кГц; для таких

преобразователей характерны следующие параметры [4, 7]: ширина полосы пропускания 1...2 кГц (т.е. добротность 20...40 при частоте резонанса 40 кГц), время затухания колебаний – не более 1...1,5 мс. Следовательно, зондирующий акустический сигнал представляет собой длительный затухающий колебательный процесс, соответствующий расстоянию в воздухе (скорость звука 343 м/с при температуре воздуха +20° С) в среднем 40 см, а в воде (скорость звука в дистиллированной воде при температуре +20° С 1550 м/с) расстоянию около 1,8...2 м. Очевидно, что на приемнике эхо-импульсы от двух различных отражателей, имеющих меньшую разность по дальности, не будут разделены, т.е. расстояния до них не могут быть измерены отдельно. Кроме того, длительный «звон» пьезоэлектрического преобразователя, возбуждаемого электрическим импульсом, не дает возможности до затухания переходного процесса использовать его в микрофонном режиме, что создает «мертвую зону» непосредственно перед локатором.

В настоящей работе обсуждается другой способ построения акустического локатора, заимствованный из радиолокации, а именно: излучение периодически повторяющихся акустических импульсов, «высокочастотное» заполнение которых линейно модулировано по частоте, и сжатие принимаемых отраженных импульсов посредством пропускания их через согласованный фильтр. В таком случае, как показано в [8] и многих других классических работах по теоретическим основам радиотехники и радиолокации, повышается как разрешающая способность по дальности, так и чувствительность локатора.

Радиоимпульс с прямоугольной огибающей амплитудой A_0 , длительностью T , средней частотой f_0 и ЛЧМ заполнением имеет вид

$$s(t) = \begin{cases} A_0 \cos(2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f \cdot t^2 / T), & -T/2 < t < T/2, \\ 0, & t < -T/2 \text{ и } t > T/2, \end{cases}$$

где Δf – полное изменение частоты заполнения за время T . После прохождения через идеальный согласованный фильтр без потерь огибающая такого импульса приобретет вид

$$A(t) = \sqrt{m} A_0 \frac{\sin 2\pi \Delta f (t - T)}{2\pi \Delta f (t - T)},$$

где $m = \Delta f T$. Если оценивать ширину основного лепестка огибающей на уровне -3 дБ от пикового значения, то коэффициент сжатия ЛЧМ импульса по времени на выходе согласованного фильтра (следовательно, и улучшение разрешающей способности по дальности) составит $m = \Delta f T$. Кроме того, амплитуда сигнала в пике на выходе

согласованного фильтра (и соответствующее улучшение чувствительности радара) будет увеличена в $m^{1/2}$ раз.

Рассмотрим практическую реализацию обсуждаемого здесь подхода для построения акустического локатора.

Техника и результаты эксперимента. Очевидно, возможности акустического локатора данного типа будут в основном зависеть от примененного излучателя, а именно – от его широкополосности и равномерности амплитудно-частотной характеристики во всей используемой полосе частот, которая должна быть, по крайней мере, шире одной октавы. Выяснилось, что для проведения экспериментов практически возможно использовать только электродинамический излучатель (динамическую головку) высокочастотной области звукового диапазона, поскольку большинство известных типов ультразвуковых излучателей (в том числе и пьезоэлектрические) являются узкополосными, как это обсуждалось выше; другие же типы звуковых излучателей – изодинамические, ортодинамические, ионофонные и т.п. – практически недоступны. В результате была использована высокочастотная динамическая головка URAL AS-W16254K GRAND. Именно ее номинальный диапазон частот 5...20 кГц (две октавы) определил рабочий диапазон развертки частоты внутриимпульсного заполнения акустического локатора.

При построении локатора была использована схема с отдельными излучателем и приемником акустического сигнала, поскольку чувствительность динамических головок в микрофонном режиме недостаточна. В качестве микрофона использовался широко распространенный ненаправленный электретный микрофон EM6027 [9], имеющий практически плоскую амплитудно-частотную характеристику чувствительности в диапазоне 0,1...20 кГц. В ряде опытов микрофон помещался в воронкообразный пластиковый рупор с диаметром раскрытия 12 см, что повышало отношение амплитуды отраженных сигналов к амплитуде непосредственно принимаемого зондирующего сигнала. Сигнал, принимаемый микрофоном, усиливался однокаскадным усилителем с полосой частот 1...50 кГц на малошумящем операционном усилителе OP213 (Analog Devices, Inc), после чего подавался на вход цифрового осциллографа Velleman PCS100/8031, в котором записывался в файл и передавался для дальнейшей математической обработки (не в реальном времени) в компьютерную программу, написанную в среде MATLAB. Обработка состояла в имитации пропускания принимаемого

сигнала через согласованный с ЛЧМ-импульсом фильтр. Передаточная функция этого фильтра $H(z)$ была реализована на основе встроенной в MATLAB функции `filter(b, a, X)`, в которой X – вектор отсчетов сигнала, b и a – векторы коэффициентов фильтра в соответствии с формулой:

$$H(z) = \frac{\sum_{k=1}^K b_k z^{-k+1}}{\sum_{m=1}^M a_m z^{-m+1}}.$$

С целью реализации согласованного фильтра в программе генерировался массив отсчетов идеальной копии зондирующего ЛЧМ-импульса в зеркальном отображении, который затем служил в качестве коэффициентов b_k . Коэффициенты a_m определялись следующим образом: $a_1 = 1$, $a_m = 0$ для $m > 1$. Таким образом, был получен программный фильтр с конечной импульсной характеристикой, являющейся зеркальным отражением отсчетов исходного импульса с ЛЧМ, т.е. согласованный с таким импульсом.

В качестве формирователя электрического импульсного сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением был выбран интегральный прямой цифровой синтезатор частоты [10] (далее – DDS, Direct Digital Synthesizer) AD9958 [11]. Синтезатор имеет два независимых канала синтеза, однако в данной конструкции акустического локатора использовался только один канал. Синтезатор такого типа имеет встроенный внутренний умножитель тактовой частоты и может работать с максимальной тактовой частотой 500 МГц, что позволяет получать сигналы с частотами первой зоны Найквиста до 150...200 МГц. В нашем случае была использована получаемая от монолитного кварцевого генератора CO1025-T тактовая частота 16,384 МГц (без ее внутреннего умножения), поскольку максимальная частота синтезируемого сигнала не превышает 20 кГц. AD9958 имеет встроенные аппаратные возможности для линейной развертки частоты с заданной скоростью, а также управления амплитудой выходного колебания, что позволило обойтись без дополнительных аналоговых каскадов при формировании ЛЧМ импульсов с заданной крутизной переднего и заднего фронтов их огибающей. Сглаживание фронтов импульсов позволило уменьшить влияние переходных акустических процессов, возникающих в динамической головке, на качество формируемого сигнала.

Синтезатор частоты функционировал под управлением микроконтроллера ATtiny2313 фирмы ATMEL. Управление режимами синтезатора осуществлялось следующим образом [11].

Внутренние регистры синтезатора (конфигурация внутренних устройств, начальная частота, скорость нарастания в режиме развертки по частоте, коэффициент умножения внешней тактовой частоты и т.п.) программировались по «однобитовому» последовательному интерфейсу через вывод SDIO_0, а также с использованием входа для тактовой последовательности SCLK и входа разрешения загрузки IO_UPDATE. Такая конфигурация последовательного порта дает возможность высвободить вывод SDIO_3 для включения режима плавного нарастания или плавного убывания амплитуды формируемого ЛЧМ-импульса. Сглаживание фронтов импульсов позволило уменьшить влияние переходных акустических процессов, возникающих в динамической головке, на качество формируемого сигнала. Запуск сканирования (нарастания) частоты заполнения формируемого на выходе синтезатора ЛЧМ-импульса осуществляется подачей уровня логической единицы на вывод синтезатора Profile pin 2 одновременно с подачей логической единицы на вывод SDIO_3, разрешающей начало нарастания амплитуды.

Регулировка всех параметров формируемых импульсов (длительности, периода, начальной частоты и скорости ее нарастания, крутизны фронтов) осуществлялась посредством изменения программы микроконтроллера.

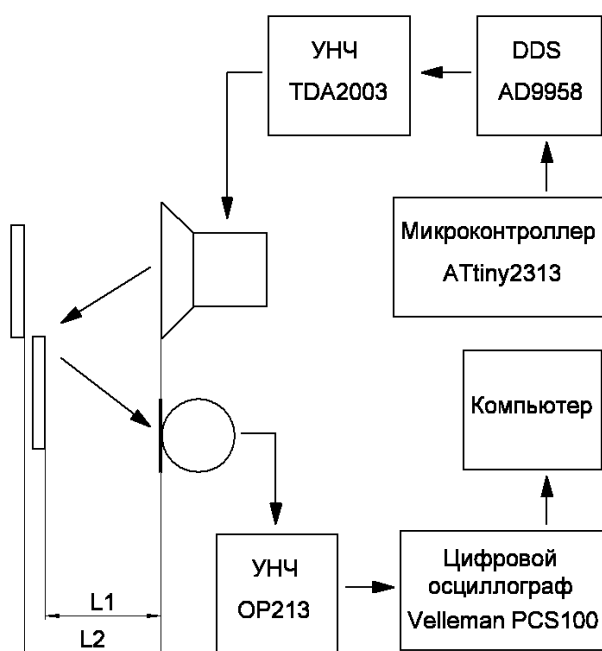


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки акустического локатора

Выходной сигнал синтезатора частоты через усилитель мощности на интегральной микросхеме TDA2003 подводился к динамической головке. Выходная мощность сигнала в импульсе составляла 100 мВт.

В качестве отражателей применялись две алюминиевые пластины размером 20x20 см, не перекрывающие друг друга, но расположенные на разных расстояниях от локатора (считая от диффузора динамической головки).

В эксперименте использовались следующие параметры зондирующего сигнала: период повторения импульсов 12 мс, длительность импульса $T = 1,5$ мс, начальная и конечная частоты заполнения импульса соответственно 5 кГц и 15 кГц, т.е. $\Delta f = 10$ кГц, что соответствует коэффициенту сжатия $m = 15$. С микрофонного усилителя сигнал считывался цифровым осциллографом с периодом дискретизации 12,5 мкс.

На рисунке 3 представлены результаты эксперимента: вид сигнала на выходе микрофонного усилителя до его сжатия (а, б) и после прохождения через согласованный фильтр (в, г). Ось абсцисс рисунка 3 проградуирована в номерах отсчетов сигнала. По полученным результатам эксперимента можно оценить практически достигнутую величину его коэффициента сжатия: около 12, если оценивать ширину импульсов по половине высоты их огибающих. Также можно наблюдать, что до операции сжатия отраженные импульсы от препятствий, расположенных на расстояниях $L_1 = 63$ см и $L_2 = 75$ см (расстояния измерены рулеткой, см. рисунок 2) от диффузора динамической головки, перекрываются без возможности их разрешения, тогда как после прохождения через согласованный фильтр они воспринимаются отдельно.

Разность количества отсчетов (рисунок 3, г) от пика сжатого зондирующего импульса до пиков сжатых импульсов отражений от первой и второй пластин составила 286 и 346 отсчетов, что соответствует расстояниям $L_1 = 61,3$ см и $L_2 = 74,2$ см для скорости звука 343 м/с.

Как следует из рисунка 3, расстояние между отражателями можно уменьшить примерно вдвое (до 25...30 отсчетов, что соответствует 5,5...6,5 см) без потери разрешения. Эту величину мы и будем принимать за достигнутое значение разрешения по дальности исследуемого здесь макета акустического локатора.

Отметим, что длительность зондирующего импульса у разработанного нами акустического локатора (1,65 мс) соответствует длительности зондирующего импульса предварительно исследованного нами промышленно выпускаемого сонара с пьезоэлектрическим преобразователем MB7076 (1,4 мс). При этом разрешение по дальности в сравнении с MB7076 было улучшено в 4...4,5 раза.

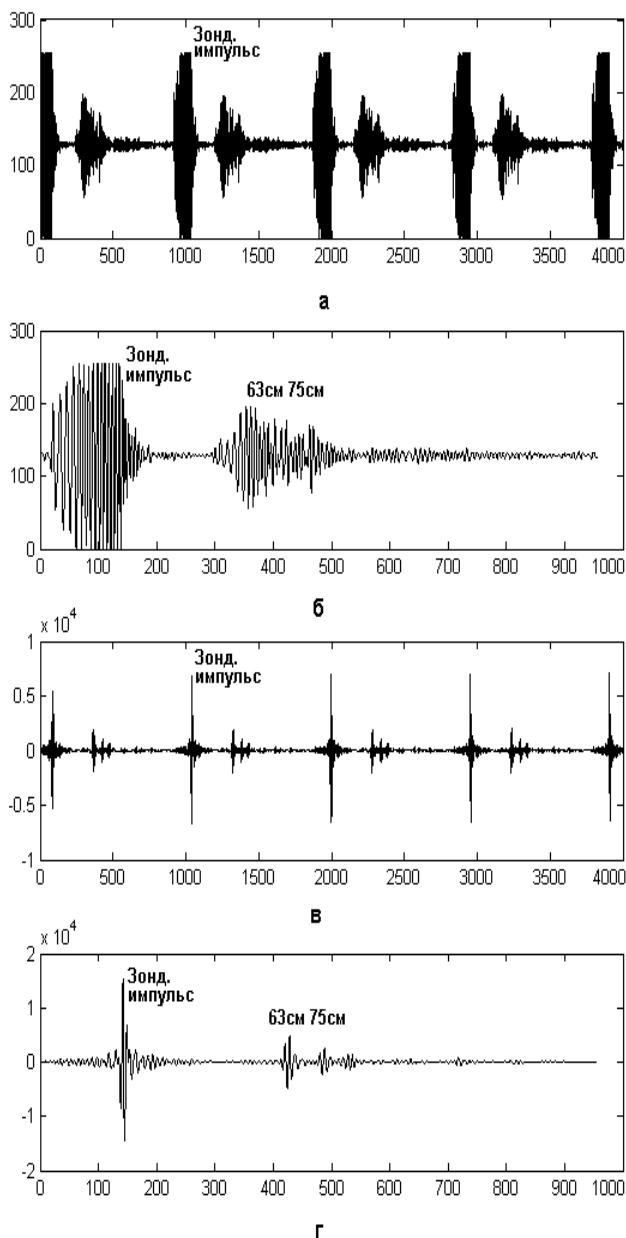


Рисунок 3 – Зондирующий и отраженные импульсы: а - на входе осциллографа (без сжатия); б - на входе осциллографа (без сжатия) – один период; в - на выходе согласованного фильтра; г - на выходе согласованного фильтра (один период)

Заключение. Широко применяемые в настоящее время акустические локаторы (сонары) с пьезоэлектрическими преобразователями имеют разрешения по дальности около 20...30 см. Предложенный в настоящей работе подход к построению акустического локатора с использованием зондирующих импульсов с линейной частотной модуляцией позволяет повысить разре-

шение по дальности за счет обработки (сжатия) отраженных от целей сигналов в согласованном фильтре. В описываемом в статье случае выигрыш экспериментальной установки акустического локатора, в которой используются ЛЧМ-импульсы, по сравнению с промышленно выпускаемым сонаром MB7076 по параметру разрешение по дальности составил 4...4,5 раза.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ № 2014/178.

Библиографический список

1. Баранов И.В., Езерский В.В., Каминский А.Ю. Измерение толщины льда при помощи частотно-модулированного дальномера // Измерительная техника. – 2008. № 7. – С. 21-25.
2. Баранов И.В., Езерский В.В. Влияние помех на погрешность измерения расстояния в частотном дальномере промышленного применения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 38. С.34-40.
3. История отечественной радиолокации / под ред. А.С. Якунина, Ю.А. Кузнецова, А.А. Рахманова, С.А. Муравьева. – М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2011. – 768 с.
4. Ultrasonic Sensor Product Catalog / MaxBotix Inc., 2014 (электронный ресурс) http://www.maxbotix.com/Ultrasonic_Sensors.htm
5. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: Издательство стандартов, 1970. – 239 с.
6. Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. школа, 1987. – 352 с.
7. Air Ultrasonic Ceramic Transducers 400EP14D: S. Square Enterprise Company (электронный ресурс) Limited / Pro-Wave Electronics Corporation, 2012. <http://www.pro-wave.com.tw>.
8. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / пер. с англ. под ред В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
9. EM6027, EM6027S-BC, & EM6027P: Omnidirectional Electret Condenser Microphone (электронный ресурс) / Soberton Inc., 2011. <http://www.soberton.com/products/electret-condenser-microphones/>
10. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 224 с.
11. 2-Channel, 500 MSPS DDS with 10-Bit DACs AD9958 (электронный ресурс) / Analog Devices, Inc. 2008. www.analog.com.