

УДК 621.389

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА МЕГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

М. Ф. Пышный, С. В. Пышная

Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля Российской академии наук,
119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4

Статья поступила в редакцию 31 августа 2018 г.

Аннотация. Предложен метод измерения перемещения отражающего ультразвук объекта с помощью эхо-импульсного зондирования ультразвуковым излучением мегагерцового диапазона. Метод предназначен для измерения небольших по сравнению с длиной волны зондирующего ультразвука величин. Областью применения метода является аппаратура ультразвуковой медицинской диагностики, работающая в режимах эластографии и эластометрии. Для исследования данного метода авторами разработана и изготовлена экспериментальная установка, основной составной частью которой является модифицированный опытный образец ультразвукового эхотомоскопа среднего класса. Приведены результаты проверки осуществимости метода и первые результаты исследования случайной погрешности измерений.

Ключевые слова: ультразвук, измерение перемещения, ультразвуковой эхотомоскоп.

Abstract. Soft tissue displacement measurement techniques are important part of elasticity imaging technologies. Accuracy of the techniques defines elasticity imaging performance. The paper presents small displacement measurement technique, which can be realized using ultrasonic medical scanner hardware. The technique can be used for very small tissue displacement detection and measurement downward to several nanometers. To study the technique main properties and test their performance, experimental setup was created by the authors. The setup detailed description is presented in the paper. The setup contains modified medium performance ultrasonic scanner prototype equipped with 7.5 MHz linear probe, ultrasound phantom and linear actuator. The results of the technique testing are presented.

Key words: ultrasound, displacement measurement, ultrasonic scanner.

Введение

Большинство методов ультразвуковой медицинской эластографии и эластометрии базируется на измерении небольших смещений мягких тканей относительно положения равновесия ([1],[2]). Максимальные значения измеряемых величин лежат в микронном и субмикронном диапазоне. Пространственно-временное распределение смещения мягких тканей регистрируют с помощью ультразвукового эхотомоскопа (ультразвукового сканера) и восстанавливают по нему пространственное распределение механических характеристик тканей внутри исследуемой области. Точность регистрации смещения ткани относительно положения равновесия тесно связана с информативностью таких методов исследования в целом. Она определяет точность характеристики ткани, контраст и разрешение изображений, и поэтому имеет ключевое значение при разработке соответствующих направлений ультразвуковой диагностики.

В настоящей работе предложен метод измерения перемещения отражающего ультразвук элемента по сигналу приемника ультразвукового сканера. Для его исследования была разработана и изготовлена экспериментальная установка, основной составной частью которой является опытный образец малогабаритного ультразвукового диагностического сканера. Аппаратное и программное обеспечение сканера было существенно модифицировано с целью реализации необходимых исследовательских методик, но основные характеристики прибора остались неизменными и примерно соответствовали ультразвуковому диагностическому сканеру среднего класса. На данной установке была проверена осуществимость предложенного метода и исследована его случайная погрешность измерений.

Модель процесса измерения

Чтобы измерить величину перемещения объекта в течение некоторого промежутка времени, необходимы, по меньшей мере, два цикла зондирования этого объекта. В каждом цикле передатчик прибора излучает одинаковые зондирующие импульсы, а приемник регистрирует (усиливает, дискретизирует и

запоминает) эхо-сигналы, отраженные объектом. Длительность зондирующего импульса в реальном ультразвуковом сканере составляет, как правило, от полутора до десяти периодов несущей частоты передатчика сканера. Несущая частота находится в пределах, ориентировочно, от 3 до 10 МГц, длина волны ультразвукового излучения при этом, примерно, от 150 до 500 микрон. Перемещение объекта в данном случае всегда будет много меньше длины волны зондирующего излучения. При столь малом перемещении можно считать, что регистрируемый приемником эхо-сигнал имеет неизменную форму и только смещается во времени на некоторую величину τ . Это смещение связано с перемещением отражателя простейшей формулой геометрической акустики:

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (1)$$

где d - смещение отражателя вдоль направления акустического луча (положительная величина - удаление от датчика, отрицательная - приближение);

c - скорость звука в ближайшей окрестности отражателя.

В реальном приборе всегда есть тепловой шум приемника и погрешность дискретизации. Могут присутствовать и другие факторы, влияющие на точность процедуры измерения, например, помехи. Мы предполагаем, что действие всех факторов, приводящих к неточности регистрации эхо-сигналов, аналогично небольшому аддитивному шуму.

Обозначим эхо-сигналы отражателя на выходе приемника в первом и втором циклах зондирования $r(t)$ и $s(t)$, где t обозначает время (точкой отсчета времени в каждом цикле является начало зондирующего импульса).

Тогда

$$r(t) = r_0(t) + \varepsilon_r(t), \quad s(t) = s_0(t) + \varepsilon_s(t) \quad (2)$$

где $r_0(t), s_0(t)$ - "идеальные" эхо-сигналы, которые регистрировал бы приемник в отсутствие всех погрешностей регистрации;

$\varepsilon_r(t), \varepsilon_s(t)$ - случайные функции, отображающие все погрешности регистрации

СИГНАЛОВ.

В рамках принятой модели $r_0(t)$ и $s_0(t)$ связаны соотношением

$$r_0(t) = s_0(t - \tau) \quad (3)$$

и смещение отражателя в пространстве можно вычислить по смещению эхо-сигнала во времени согласно формуле (1):

$$d = \frac{\tau C}{2} \quad (4)$$

Таким образом задача измерения перемещения отражателя в пространстве сводится к задаче определения смещения эхо-сигнала во времени, причем в данном случае этот сдвиг будет много меньше периода несущей частоты этого сигнала.

Метод расчета смещения эхо-сигнала во времени

Приближенное значение величины τ можно искать из условия наилучшего среднеквадратичного приближения сигнала $r(t)$ сигналом $s(t)$ при сдвиге сигнала $s(t)$ во времени:

$$\delta(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} (r(t) - s(t - \tau))^2 dt \rightarrow \min \quad (5)$$

Перейти от непрерывных функций к их отсчетам в данном случае нетрудно, так как в ультразвуковой эхотомографии условия теоремы отсчетов Котельникова выполняются практически всегда. Спектр принимаемых сигналов ограничен, по крайней мере, в силу свойств датчика, а частоту дискретизации обычно выбирают существенно больше удвоенной верхней частоты спектра. Поэтому, в силу теоремы Котельникова, сигналы $r(t)$ и $s(t - \tau)$ можно восстановить по их отсчетам:

$$r(t) = \sum_n r(nT) \text{sinc}(t/T - n) \quad (6)$$

$$s(t - \tau) = \sum_n s(nT - \tau) \text{sinc}(t/T - n) \quad (7)$$

где $\text{sinc}(x)$ - функция отсчетов:

$$\operatorname{sinc}(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, & x \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

T - период дискретизации, n - номер отсчета. Момент времени nT соответствует времени дискретизации n -го отсчета сигнала аппаратурой приемника.

Подставляя (6) и (7) в (5) и учитывая, что функции отсчетов образуют ортонормированный базис в пространстве L_2 , получим

$$\delta(\tau) = \sum_n (r(nT) - s(nT - \tau))^2 \quad (9)$$

Чтобы вычислить отсчеты сигнала $s(t)$ в моменты времени $nT - \tau$ по отсчетам в моменты времени nT , запишем выражение для интерполяции непрерывного сигнала $s(t)$ в следующем виде:

$$s(t) = \sum_k s(kT) \operatorname{sinc}(t/T - k) \quad (10)$$

При $t = nT - \tau$ выражение (10) примет вид

$$s(nT - \tau) = \sum_k s(kT) \operatorname{sinc}(n - k - \tau/T) \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9), получим дискретный аналог соотношения (5), в котором присутствуют только отсчеты сигналов на одной регулярной сетке дискретизации nT :

$$\delta(\tau) = \sum_n (r(nT) - \sum_k s(kT) \operatorname{sinc}(n - k - \tau/T))^2 \quad (12)$$

Если уровень шумов много меньше уровня полезного сигнала, при достаточно малых значениях τ зависимость $\delta(\tau)$ будет близка к параболе. В этом случае справедливо приближенное равенство $s(t - \tau) \cong r(t) - r'(t)\tau$. Подставляя его в (5), получим

$$\delta(\tau) \cong \tau^2 \int_{-\infty}^{\infty} (r'(t))^2 dt \quad (13)$$

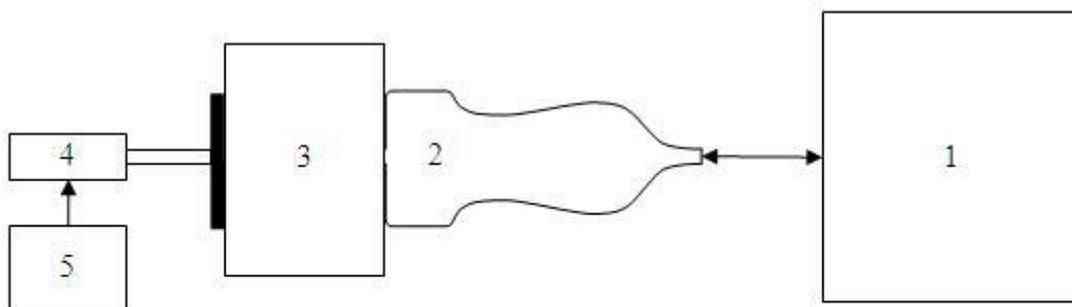
Тем не менее можно предполагать, что при каких-то условиях в связи с наличием шума $\delta(\tau)$ не будет выпуклой функцией и в окрестности глобального минимума появятся локальные минимумы. Чтобы убедиться в том, что $\delta(\tau)$

имеет единственный минимум при условии $|\tau| \leq T$, ее свойства были исследованы экспериментально (см. Результаты экспериментов). Локальные экстремумы $\delta(\tau)$ в наших экспериментах обнаружены не были.

Для поиска минимума такого рода функций можно воспользоваться итерационным алгоритмом перебора с переменным шагом. На первой итерации область поиска делится на N отрезков, в концевых точках отрезков вычисляются значения $\delta(\tau)$ и простым перебором находится точка τ_i с минимальным значением $\delta(\tau_i)$. На второй итерации выбирается отрезок $[\tau_{i-1}, \tau_{i+1}]$ и выполняются те же самые операции, и т.д. до достижения требуемой точности. В нашей программе расчета величины перемещения применялось пять итераций данного алгоритма при $N=20$, т.е. каждая итерация увеличивала точность на порядок.

Техника и методики эксперимента

Для проверки модели процесса измерения и исследования его основных характеристик была изготовлена экспериментальная установка, основной составной частью которой является модифицированный опытный образец ультразвукового сканера (разработан и изготовлен ООО "Центр медицинского акустовидения", г.Москва), оснащенный линейным ультразвуковым датчиком. Установка также содержит ультразвуковой фантом, линейный двигатель и низкочастотный генератор (рис. 1).



1 - ультразвуковой сканер, 2 - ультразвуковой датчик, 3 - ультразвуковой фантом, 4 - линейный двигатель, 5 - низкочастотный генератор.

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

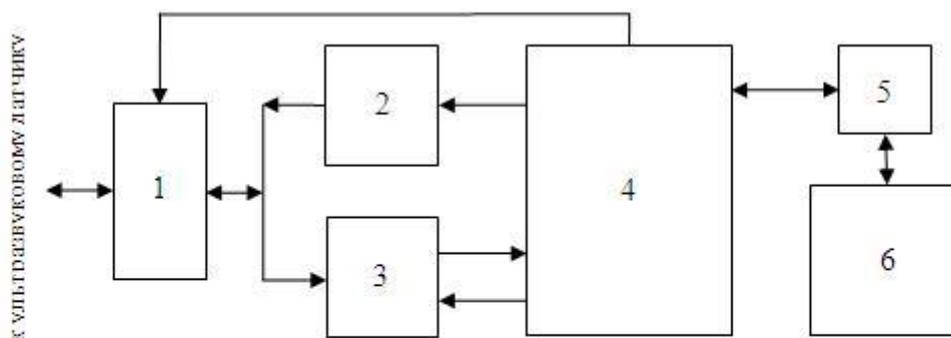
Конструкция линейного двигателя в основном аналогична силовой части обычного электродинамического громкоговорителя. В корпусе двигателя находится кольцевой магнит с цилиндрическим сердечником. Между магнитом и сердечником имеется цилиндрический зазор. Магнитное поле внутри зазора ориентировано перпендикулярно оси симметрии сердечника. Подвижная часть двигателя содержит цилиндрическую катушку, которая удерживается внутри зазора с помощью гофрированной мембраны. К катушке прикреплен шток (тонкостенная трубка диаметром около 5 мм). На конце штока находится прямоугольная металлическая пластина размерами около 15x15 мм, присоединяемая к ультразвуковому фантому.

Двигатель был подключен к выходу низкочастотного генератора, амплитуда выходного сигнала которого регулировалось вручную в пределах от 0 до 5 Вольт, а частота - в пределах от 10 до 100 Гц.

Ультразвуковые фантомы изготавливались из желатина и имели форму параллелепипеда размером 50x20x25 мм. Датчик и двигатель присоединяли к противоположным торцам фантома, находящимся на расстоянии 20 мм. Для уменьшения влияния вибраций поверхности стола фантом, датчик и двигатель фиксировались на поверхности металлической плиты.

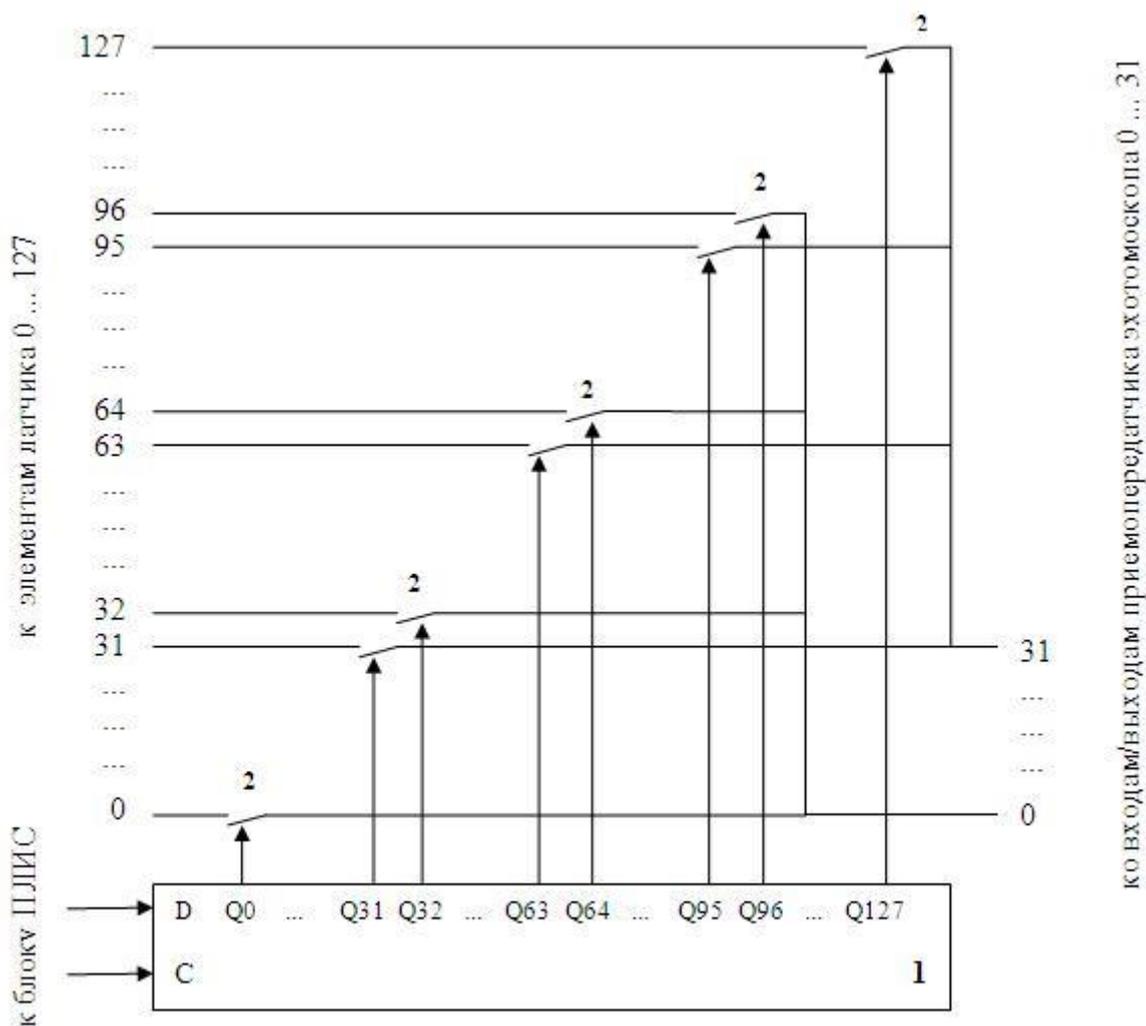
Во всех экспериментах применялся один линейный широкополосный датчик типовой конструкции, используемой в аппаратуре ультразвуковой медицинской диагностики ([3]). Основой датчика является 128-элементная одномерная решетка электроакустических пьезопреобразователей, на фронтальную (обращенную к объекту исследования) сторону которой наклеена цилиндрическая акустическая линза. На противоположную сторону решетки преобразователей наклеен акустический демпфер, поглощающий ультразвуковое излучение, распространяющееся в противоположном от объекта направлении.

Ультразвуковой сканер (рис. 2) состоит из блока коммутатора элементов датчика, блока выходных элементов передатчика, блока регистрации сигналов приемника, блока программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), блока интерфейса USB и компьютера.



1 - блок коммутатора элементов датчика, 2 - блок выходных элементов передатчика, 3 - блок регистрации сигналов приемника, 4 - блок ПЛИС, 5 - блок интерфейса USB 3.0, 6 - компьютер.

Рис. 2. Блок-схема ультразвукового сканера.



1 - 128 - битовый регистр сдвига, 2 - аналоговые ключи.

Рис. 3. Функциональная схема блока коммутатора элементов датчика.

Модификации сканера в основном касались источника питания передатчика (использовался высококачественный линейный источник питания), реализованных на ПЛИС цифровых схем прибора, а также математического обеспечения компьютера.

Коммутатор элементов датчика (функциональная схема изображена на рис. 3) предназначен для выбора 32 из 128 элементов решетки, используемых в конкретном цикле зондирования исследуемого объекта.

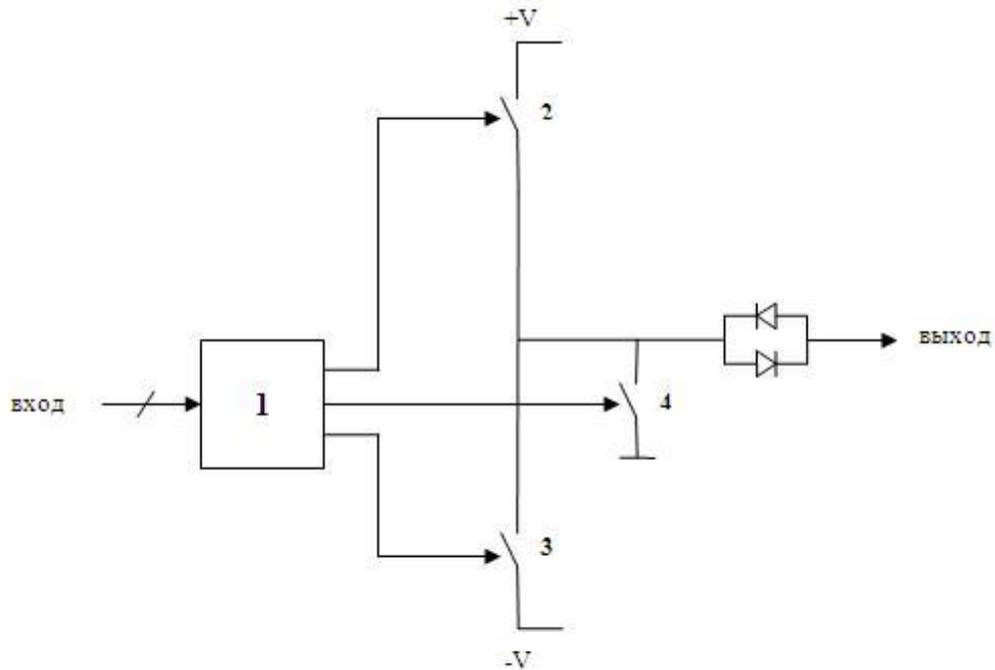
Коммутатор содержит 128 аналоговых ключей, управляемых выходом 128-битового сдвигового регистра. Каждый ключ соединен, с одной стороны, с одним из 128 элементов датчика, а с другой - с одним из 32 каналов (входов/выходов) приемопередатчика прибора. Номер канала определяется как остаток от деления номера элемента на 32. Такая схема действует как набор из 32 двунаправленных мультиплексоров 4x1 и позволяет подключить к приемопередатчику прибора те 32 элемента решетки, с которыми он в данный момент работает.

Блок выходных элементов передатчика содержит 32 одинаковых формирователя импульсов, подаваемых на элементы датчика для генерации зондирующего импульса. Упрощенная функциональная схема одного формирователя изображена на рис. 4.

Формирователь содержит три аналоговых ключа, подключающих выход элемента (через диодный ключ) к положительной и отрицательной шине источника питания и земле. Состоянием ключей управляет схема управления ключами, имеющая двухбитовый вход. Элемент работает следующим образом. При одинаковом состоянии входных линий (00 или 11) замыкается ключ 4. При подаче на вход комбинации 01 замыкается ключ 2, а при 10 - ключ 3. Таким образом при соответствующем управлении элемент генерирует симметричные прямоугольные импульсы, после чего выход элемента подключается к земле.

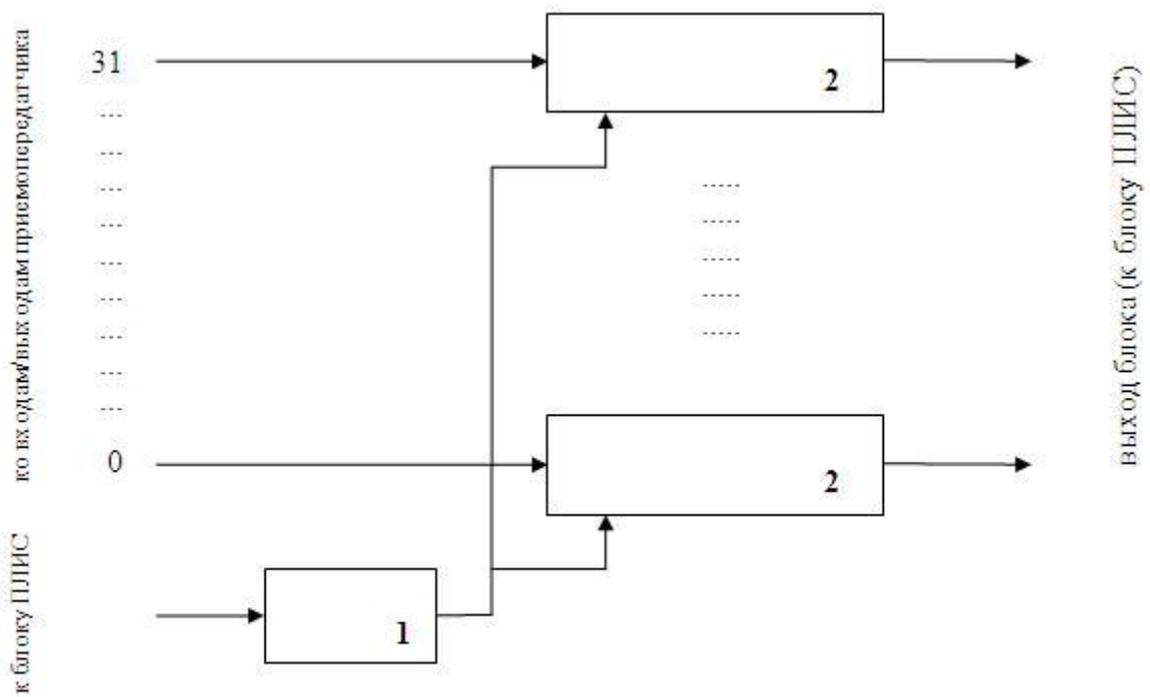
Блок регистрации сигналов приемника (рис. 5) содержит 32 одинаковых узла (канала приемника), обеспечивающих усиление, фильтрацию и дискретизацию поступающих от датчика сигналов, а также восьмибитовый

цифроаналоговый преобразователь для управления усилением приемника.



1 - схема управления ключами, 2, 3, 4 - аналоговые ключи.

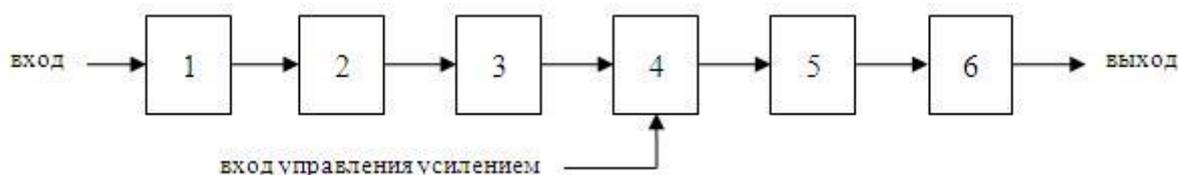
Рис. 4. Функциональная схема выходного элемента передатчика.



1 - восьмибитовый ЦАП управления усилением,
2 - узлы регистрации сигналов (каналы) приемника.

Рис. 5. Функциональная схема блока регистрации сигналов приемника.

Функциональная схема одного канала приемника изображена на рис. 6. Канал содержит последовательно соединенные узел защиты малошумящего усилителя, малошумящий усилитель (МШУ), фильтр верхних частот (ФВЧ), управляемый усилитель, фильтр нижних частот (ФНЧ) и аналогоцифровой преобразователь (АЦП). МШУ обеспечивает усиление слабых сигналов, поступающих от ультразвукового датчика, до величин, необходимых для его дальнейшей обработки. ФВЧ подавляет не представляющую интереса область низких частот (от нуля до приблизительно 100 кГц). ФНЧ подавляет высокочастотные шумы выше, ориентировочно, 10 мГц. Управляемый усилитель (диапазон регулировки около 40 дБ) служит для подбора оптимального коэффициента усиления приемника. 12-битовый АЦП дискретизирует сигнал приемника с частотой 50 мГц. Вход МШУ защищен от перегрузки узлом защиты, который действует как электронный ключ, отключающий вход МШУ от входа канала, когда сигнал на входе превышает пороговое значение около 1,5 Вольт.



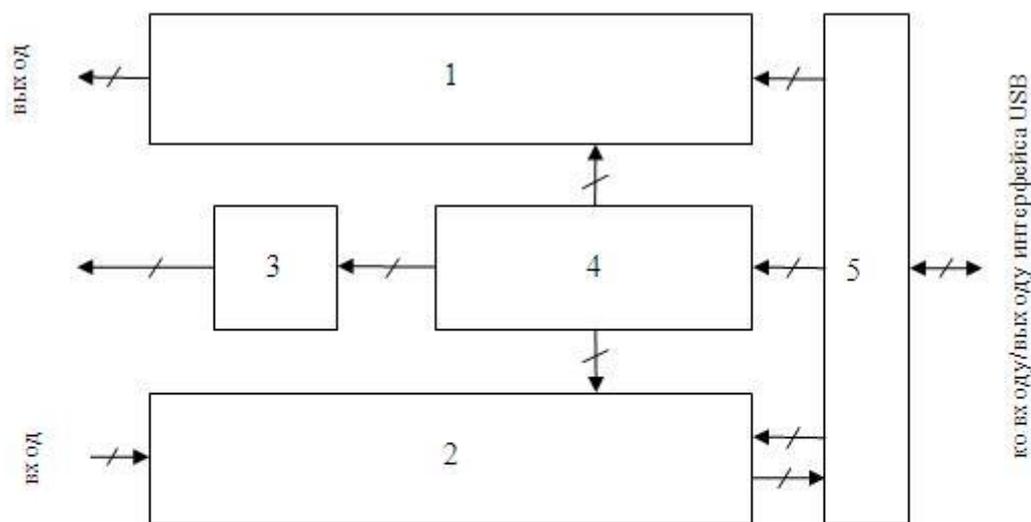
1 - узел защиты малошумящего усилителя, 2 - малошумящий усилитель,
3 - фильтр верхних частот, 4 - управляемый усилитель, 5 - фильтр нижних частот,
6 - аналогоцифровой преобразователь (12 бит).

Рис. 6. Функциональная схема одного канала приемника.

Блок интерфейса USB можно рассматривать как преобразователь интерфейса USB 3.0 в четырехбайтовую параллельную синхронную безадресную шину, предназначенную для передачи достаточно больших (не менее 64К байт) блоков данных (дискретизованный сигнал приемника из прибора в компьютер и управляющая информация от компьютера в прибор).

Компьютер имеет обычную среднюю конфигурацию настольного ПК (процессор Intel Core i5 с тактовой частотой 3.2 ГГц, память 8 Гбайт).

Цифровая часть прибора находится в блоке программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Она содержит цифровой передатчик, цифровой приемник, узел управления коммутатором элементов датчика, узел синхронизации и управления, а также четырехбайтовый параллельный интерфейс (рис. 7).



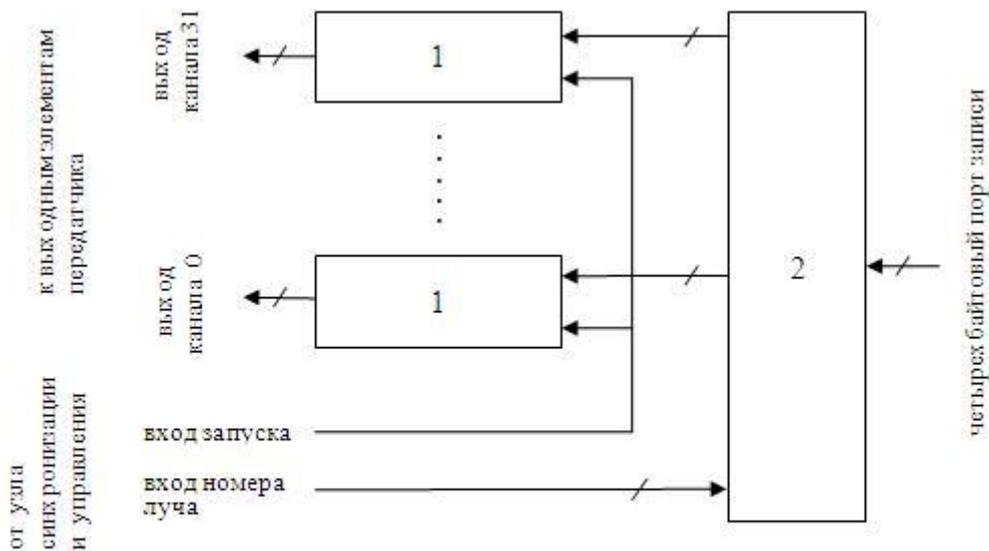
1 - цифровой передатчик, 2 - цифровой приемник, 3 - узел управления коммутатором элементов датчика, 4 - узел синхронизации и управления, 5 - четырехбайтовый параллельный интерфейс.

Рис. 7. Функциональная схема блока программируемой логики.

В данном варианте схем, реализованных на ПЛИС, передатчик и приемник поддерживают только простейшие классические однолучевые методики акустического зондирования исследуемого объекта (см., например, [3]). В каждом цикле ультразвукового зондирования передатчик может генерировать только один фокусированный импульс, распространяющийся вдоль одного из 128 разрешенных направлений акустического луча. Эти направления перпендикулярны поверхности датчика и проходят через центры его элементов. Приемник работает только в однолучевом режиме, положение

приемного луча совпадает с положением луча передатчика. Чтобы избежать возможных искажений сигнала приемника, вся динамическая обработка сигнала в реальном времени (динамическая апертура и аподизация, динамическая фокусировка на прием) была полностью исключена. Фокус приемника всегда совпадал с фокусом передатчика.

Цифровой передатчик (рис. 8) содержит 32 одинаковых программируемых генератора импульсов (каналов передатчика) и двухпортовую память.



1 - генераторы импульсов (каналы) передатчика, 2 - двухпортовая память.

Рис. 8. Функциональная схема цифрового передатчика.

Устройство канала передатчика достаточно сложно, схемы каналов определены на языке AHDL (Altera Hardware Description Language), но в данных экспериментах каждый канал действовал как ждущий генератор с цифровой задержкой импульса запуска, генерирующий пакет импульсов (5 периодов) несущей частоты передатчика (6,125 МГц). Величина задержки (от 0 до 255 периодов несущей частоты, дискретность - один период, программируется одним байтом) определяется содержимым двухпортовой памяти. Двухпортовая память (4 килобайта) имеет четырехбайтовый порт

записи данных (обеспечивает запись 128 32-байтовых групп задержек из компьютера в память) и 32-байтовый порт чтения данных (передает выбранную группу задержек на входы задержки импульса запуска каналов передатчика). Адрес считываемого 32-байтового слова соответствует номеру направления акустического луча.

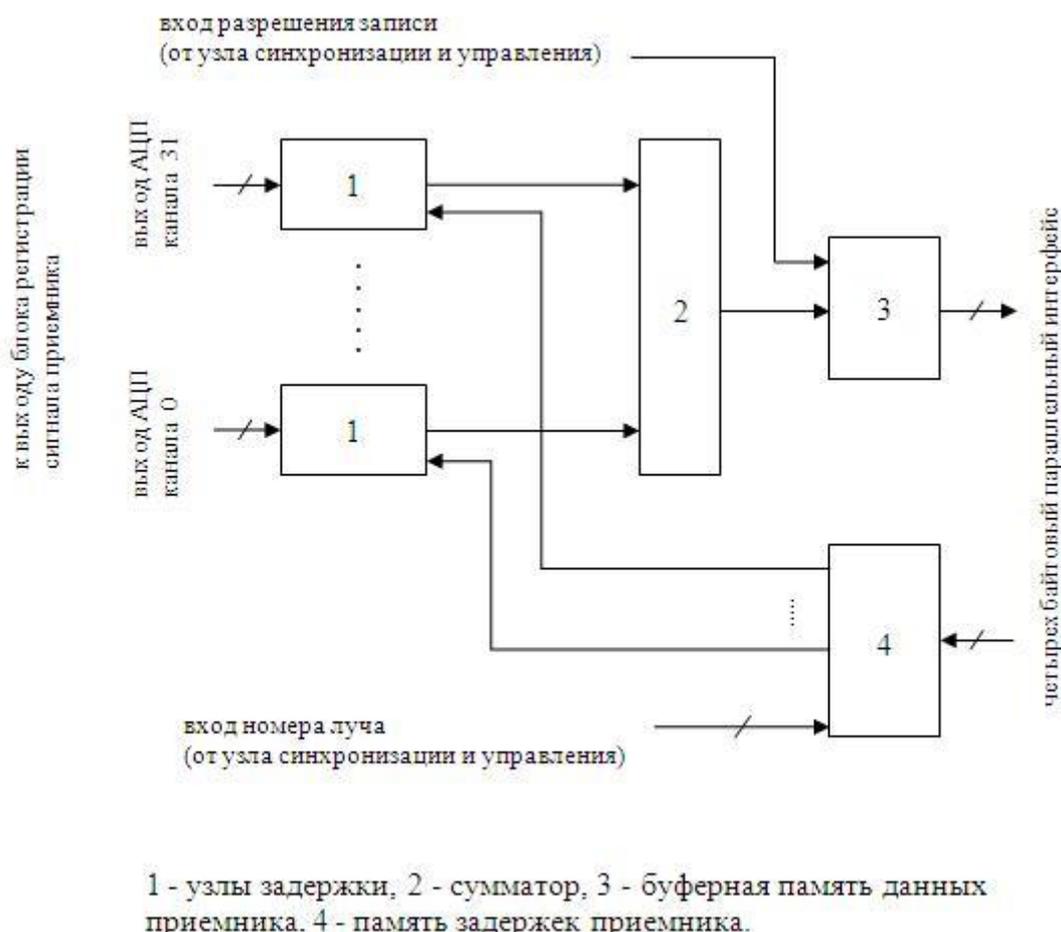


Рис. 9. Функциональная схема цифрового приемника.

Цифровой приемник (рис. 9) содержит 32 узла цифровой задержки, выходные сигналы которых суммируются 32-входовым параллельным сумматором. Сформированный цифровой сигнал приемника запоминается буферной памятью, откуда затем передается в компьютер. Управление работой узлов задержек осуществляется так же, как в передатчике. Приемник содержит такую же память, действующую точно так же. С ее 32-байтового выхода задержки поступают на входы управления узлов задержек.

Узел управления коммутатором элементов датчика - простая схема, которая согласно номеру акустического луча загружает в регистр сдвига коммутатора элементов датчика информацию о состоянии электронных ключей и генерирует сигнал разрешения работы ключей.

Узел синхронизации и управления - сложный цифровой автомат, который, согласно выбранному методу построения акустического изображения, генерирует текущий номер акустического луча и сигналы разрешения работы (запуска) передатчика, приемника и узла управления коммутатором элементов датчика, последовательно перебирая все необходимые направления акустического луча. В данных экспериментах использовался только один акустический луч, проходящий через центр датчика, период повторения зондирующих импульсов был равен одной миллисекунде.

Все эксперименты выполнялись по трем следующим методикам.

1. При неподвижной поверхности отражателя выполняли 8192 цикла зондирования и принимаемые сигналы записывали в память компьютера установки. Из этих данных в случайном порядке выбирали 100 пар сигналов. Для каждой пары сигналов по формуле (12) вычисляли зависимость $\delta(\tau)$ от смещения τ при $\tau \in [-T, T]$ с шагом $0.0001T$ (в пересчете на величину перемещения: величина перемещения в пределах ± 15.4 микрона, шаг 1,54 нанометра). Затем с помощью простого перебора массива полученных данных искали все локальные экстремумы.
2. Отражатель непрерывно вибрировал с частотой 50 Гц и амплитудой вибраций около 3-5 микрон. Все остальные операции выполнялись аналогично методике (1).
3. С целью исследования случайной погрешности измерений выполняли 8191 цикл измерения перемещения при неподвижной поверхности отражателя, затем вычисляли среднеквадратичное значение результатов измерений и строили их гистограмму.

Результаты экспериментов

Во всех экспериментах по методикам 1 и 2 $\delta(\tau)$ имела единственный минимум, локальные минимумы отсутствовали.

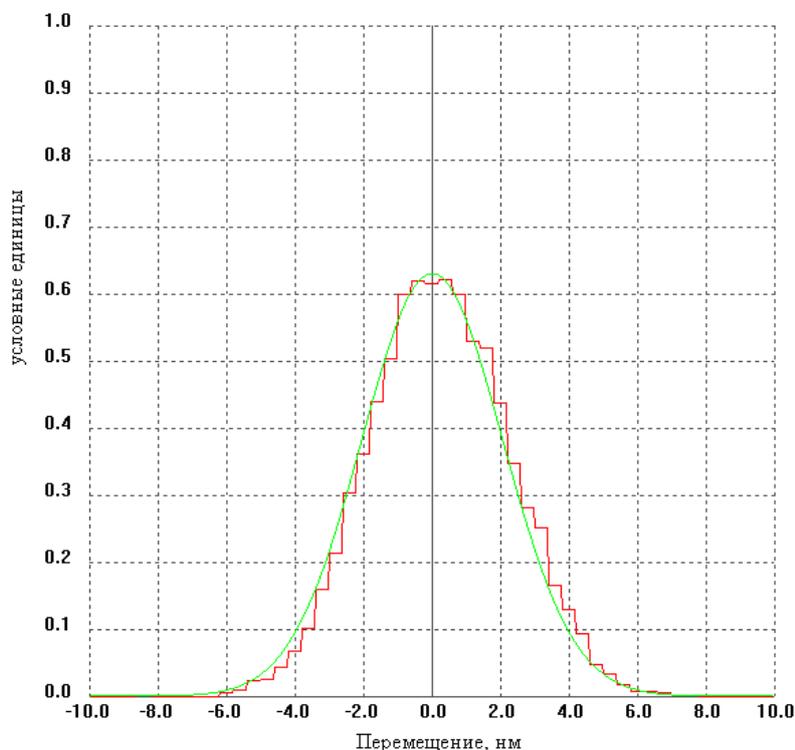


Рис. 10. Пример гистограммы случайной погрешности измерений.

В экспериментах по методике 3 гистограммы случайной погрешности результатов измерений оказались близки к гауссовой функции вида

$$f(x) = f_0 * \exp(-ax^2) \quad (14)$$

где f_0 и a - некоторые константы.

Пример гистограммы случайной погрешности измерений вместе с гауссовой функцией приведен на рис. 10.

Среднеквадратичное значение случайной погрешности измерений перемещения обычно находилось в пределах от трех до пяти нанометров. Причина таких изменений погрешности измерений осталась неясной. Полученные результаты можно рассматривать только как предварительные, требующие проверки и уточнения. Тем не менее они дают основание полагать, что данный метод и аппаратура позволяют измерять малые величины смещения

отражающей поверхности со стандартной ошибкой измерений, находящейся в пределах единиц нанометров.

Литература

1. P.N.T. Wells and H.-D. Liang. Medical ultrasound: imaging of soft tissue strain and elasticity. *J. R. Soc. Interface*. 2011, No. 8, pp. 1521-1549.
2. R.M.S.Sigrist, Joy Liau, A.El. Kaffas, M.C. Chammas, J.K.Willmann. Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *Theranostics*, 2017, Vol. 7, issue 5, pp. 1303 - 1329. DOI: [10.7150/thno.18650](https://doi.org/10.7150/thno.18650)
3. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы: режимы, методы и технологии. М.: ООО ПКФ "ИзоМед", 2011. 316 с.

Для цитирования:

М. Ф. Пышный, С. В. Пышная. Метод измерения субмикронных перемещений с помощью ультразвука мегагерцового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/8/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.8