

**Soldatov Alexey Ivanovitch**

National Research Tomsk Polytechnic University.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Тел.: +73822419605; +79095497851.

**Sorokin Pavel Vladimirovitch**

E-mail: spv@yandex.ru.

Phone: 83822419605; +79059905671.

**Soldatov Andrey Alexeyvitch**

Institute of High Voltages of National Research Tomsk Polytechnic University.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

2a, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Тел.: +73822419091.

УДК 621.3.088

**М.А. Солдатова, П.В. Сорокин, А.А. Солдатов**

**ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА**

*Предложен новый метод определения временного положения акустического импульса, позволяющий уменьшить погрешность измерения времени распространения сигнала в акустическом тракте измерительного прибора.*

*Экстремум; огибающая; эхо-сигнал.*

**M.A. Soldatova, P.V. Sorokin, A.A. Soldatov**

**USING THE PHASE SHIFT METHOD FOR CALCULATION OF ACOUSTIC  
PULSE POSITION**

*New method of acoustic pulse signal time coordinate calculation is proposed. This method allows to reduce measurement error of signal propagation time in acoustic section of measuring device.*

*Extremum; envelope; echo-signal.*

Возможность современных однокристалльных микропроцессоров с обширной периферией позволяют использовать сложные алгоритмы обработки информации с целью определения начала ультразвукового эхо-импульса.

Одним из путей достижения этой цели является использование зависимости длительности импульса, получаемого с выхода компаратора при сравнении синусоидальных колебаний нарастающей амплитуды с фиксированным уровнем от их амплитуды  $U_m = f(t_u)$  в каждом периоде сигнала.

Из рис. 1 видно, что информация о наклоне огибающей импульсного сигнала содержится в длительностях серии прямоугольных импульсов, сформированных на выходе компаратора.

Выразим амплитуду полусинусоиды на входе компаратора через длительность импульса на выходе компаратора:

$$U_{\max} = \frac{U_{\text{нор}}}{\cos \frac{\Delta\varphi}{2}},$$

где  $\Delta\varphi$  определяется из выражения:

$$\Delta\varphi = \pi \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right)$$

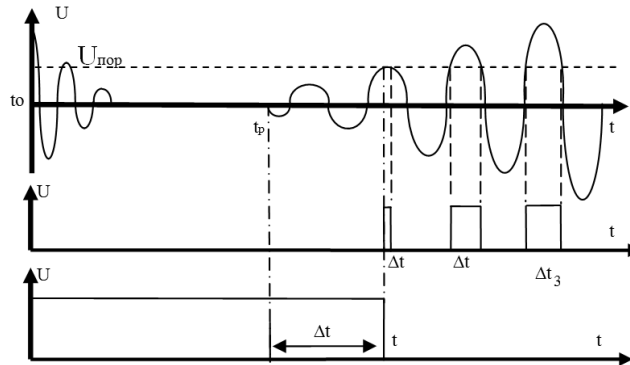


Рис. 1. Диаграмма нарастающей части эхо-сигнала (а), зависимость длительности импульсов на выходе компаратора от амплитуды эхо-сигнала (б) и ошибка в определении времени прихода эхо-сигнала (в)

Очевидно, что при этом

$$U_{\max i} = \frac{U_{\text{нор}}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t_i}{T}\right)},$$

где  $\Delta t_i$  – длительность импульса на выходе компаратора,  $T$  – период несущей частоты,  $U_{\max i}$  – амплитуда полусинусоиды в  $i$  периоде импульсного сигнала.

Для получения аппроксимирующего выражения огибающей импульсного сигнала необходимо минимум 3 точки [1]:

$$U_{\max 1} = \frac{U_{\text{нор}}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t_1}{T}\right)}; \quad U_{\max 2} = \frac{U_{\text{нор}}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t_2}{T}\right)}; \quad U_{\max 3} = \frac{U_{\text{нор}}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t_3}{T}\right)}.$$

Поскольку полученные 3 точки должны лежать на огибающей импульсного сигнала, получаем систему трех квадратных уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} Y_1 = a_1 \cdot x_1^2 + b_1 \cdot x_1 + c_1; \\ Y_2 = a_1 \cdot x_2^2 + b_1 \cdot x_2 + c_1; \\ Y_3 = a_1 \cdot x_3^2 + b_1 \cdot x_3 + c_1, \end{cases}$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – ординаты экстремумов полусинусоид, имеющие размерность времени.

Для решения этой системы уравнений находим коэффициенты  $a_1$ ,  $b_1$  и  $c_1$ , подставляем их в уравнение огибающей:

$$U = a_1 \cdot t_0^2 + b_1 \cdot t_0 + c_1.$$

Приравняв  $U = 0$ , получим квадратное уравнение, корнями которого является временная координата пересечения огибающей импульсного сигнала с нулевой линией.

$$t_0 = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1}}{2 \cdot a_1}.$$

Ошибка в определении максимальных значений амплитуды полусинусоид находится из выражения:

$$\Delta U_{\max} = \frac{U_{\text{нор}}}{2} \cdot \frac{\sin \frac{\Delta \varphi}{2}}{\cos^2 \frac{\Delta \varphi}{2}} \cdot \Delta(\Delta \varphi). \quad (1)$$

Если считать, что абсолютная ошибка в определении времени  $\Delta t$  постоянна, то по мере увеличения отношения  $\frac{U_{\max}}{U_{\text{нор}}}$  абсолютная ошибка в определении максимальной амплитуды увеличивается по закону:

$$\Delta U_{\max} = \frac{U_{\max}}{2} \cdot \text{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} \cdot \Delta(\Delta \varphi). \quad (2)$$

Из выражения 2 можно получить выражение для относительной ошибки:

$$\delta U_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \text{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} \cdot \Delta(\Delta \varphi). \quad (3)$$

Результаты расчета зависимости относительной ошибки в определении максимальной амплитуды  $\delta U_{\max}$  от относительной длительности импульса на выходе компаратора приведены на рис. 2.

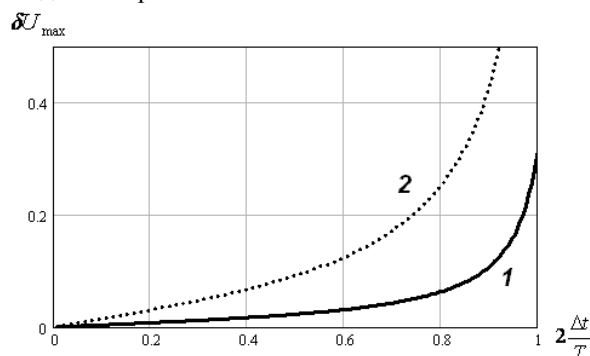


Рис. 2. Зависимость относительной ошибки в определении максимальной амплитуды от длительности импульса на выходе компаратора: 1 – для погрешности определения фазы  $\varphi = 5\%$ ; 2 – для погрешности определения фазы  $\varphi = 20\%$

Таким образом, чем больше длительность импульса на выходе компаратора, тем выше ошибка в определении максимальной амплитуды и тем выше ошибка в определении времени прихода эхо-сигнала. Кроме того, ошибка в определении максимальной амплитуды возрастает с увеличением погрешности вычисления фазы синусоидального сигнала в момент срабатывания компаратора. Поэтому этот метод можно применять только для эхо-сигналов с малой крутизной переднего фронта огибающей эхо-сигнала и для расчета использовать первые три импульса на выходе компаратора.

Оценим ошибку в определении максимальной амплитуды от точности определения фазы срабатывания компаратора, которая определяется путем вычисления временного интервала на выходе порогового устройства, связанной с возможностями аппаратуры. Если абсолютная ошибка в определении длительности импульса на выходе компаратора  $\Delta t = \tau$  то:

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta \varphi}{2} = \frac{2 \cdot \delta}{\tau}.$$

Отсюда найдем  $\Delta \varphi$ :

$$\Delta \varphi \leq 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot \delta}{\tau}.$$

С учетом того что,

$$\Delta \varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot \Delta t,$$

получаем:

$$\Delta t \leq \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot 2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot \delta}{\lambda}.$$

По результатам проведенных расчетов была построена номограмма, позволяющая определить требуемое соотношение  $\frac{U_{\text{пор}}}{U_m}$  для получения необходимой точности в определении  $U_m$ .

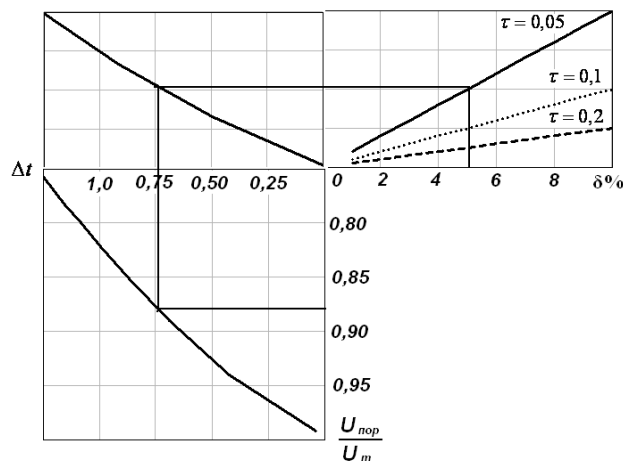


Рис. 2. Номограмма определения порогового напряжения при заданной точности вычисления амплитудного значения напряжения

Используя полученную номограмму можно определить пороговое напряжение. Для примера на номограмме показано, что для обеспечения 5 % погрешности  $\delta$  в определении максимальной амплитуды  $U_m$ , при погрешности определения длительности импульса на выходе порогового устройства  $\tau = 5\%$  необходимо выбрать  $U_{пор} = 0,88 \cdot U_m$ .

Результаты экспериментальных исследований предложенного метода представлены на рис. 3 и рис. 4. В эксперименте использовался волновод диаметром 52 мм, частота излучения составляла 40 кГц, в качестве ультразвуковых датчиков использовались датчики фирмы MURATA MA40B8S. На рис. 3 представлены осциллограммы начала эхо-сигнала и импульсов на выходе порогового устройства.

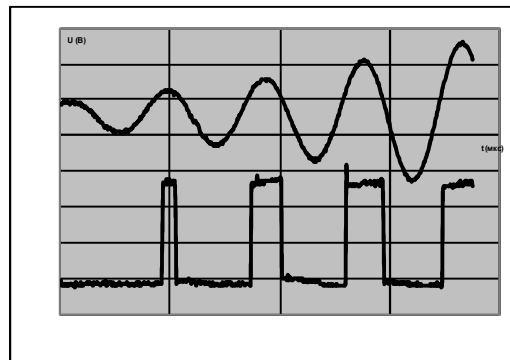


Рис. 3. Осциллограммы принятого эхо-сигнала и импульсов на выходе порогового устройства

На рис. 4 представлена зависимость погрешности измерения дальности от расстояния между датчиками. Ось ординат соответствует погрешности в определении дальности, а ось абсцисс соответствует расстоянию между излучающим и приемным датчиками измеренному с помощью калиброванной рулетки.

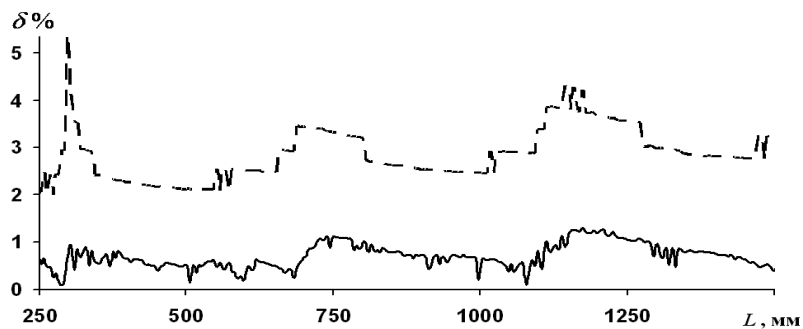


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований: пунктирная линия — метод одного компаратора; сплошная линия — фазовый метод

Результаты экспериментальных исследований показывают, что применение фазового метода обработки эхо-сигналов позволяют существенно уменьшить как систематическую составляющую погрешности, так и случайную. Однако этот метод можно применять только для эхо-сигналов с малой крутизной переднего фронта огибающей эхо-сигнала и для частот, период повторения которых можно измерить с погрешностью не менее 1 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Андре Анго*. Математика для электро- и радиоинженеров / Пер. с франц. – М.: Наука, 1967. – 779 с.

**Солдатова Мария Алексеевна**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел.: 83822419605.

**Сорокин Павел Владимирович**

E-mail: spv@yandex.ru.

Тел.: 83822419605; +79059905671.

**Солдатов Андрей Алексеевич**

НИИ ВН Национального исследовательского Томского политехнического университета.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а.

Тел.: 83822419091.

**Soldatova Mariy Alexeyvna**

National Research Tomsk Polytechnic University.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Phone: +73822419605.

**Sorokin Pavel Vladimirovitch**

E-mail: spv@yandex.ru.

Phone: 83822419605; +79059905671.

**Soldatov Andrey Alexeyvitch**

Institute of High Voltages of National Research Tomsk Polytechnic University.

E-mail: asoldatof@mail.ru.

2a, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Тел.: +73822419091.

УДК 534.6.08

**Ю.В. Шульгина, А.И. Солдатов****ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
МЕТОДОМ ДВУХ КОМПАРАТОРОВ**

*Предложен новый метод обработки эхо-импульсов, позволяющий увеличить точность акустических измерений более чем в 2 раза. Рассмотренный в статье метод используется для определения местоположения камней в почках и желчном пузыре для дальнейшего дробления мощным ультразвуком.*

*Эхо-импульс; компаратор; ультразвук.*

**Yu.V. Shulgina, A.I. Soldatov****IMPROVING ACCURACY OF ULTRASONIC MEASUREMENTS BY USING  
TWO COMPARATORS METHOD**

*A new method for processing the echo pulses, which can increase the accuracy of acoustic measurements of more than 2 times, is offered. This method used to determine the location of kidney-stones and gall bladder stones for their further fragmentation by using powerful ultrasound.*

*Echo-pulse; comparator; ultrasound.*