



УДК 681.883.072

© Г. А. Калинов, Д. С. Мигунов, В. И. Римлянд, 2009

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ НА ФАЗОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ПРИХОДА АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Калинов Г. А. – ст. науч. сотр. Института горного дела ДВО РАН, тел.: (4212) 30-18-37, e-mail: polinom@poli.khv.ru; *Мигунов Д. С.* – мл. науч. сотр., асп. Института горного дела ДВО РАН, e-mail: dimisi@mail.ru; *Римлянд В. И.* – д - р. техн. наук, проф. каф. «Физика», тел.: (4212) 22-44-19, e-mail: sci@khstu.ru (ТОГУ)

Рассматривается влияние шумов на точность фазового способа определения момента прихода акустических импульсов (регистрация акустического импульса по пересечению сигнала через нулевой уровень первой полуволны). Средствами вероятностного моделирования найдены плотности вероятности ошибок измерения и выявлена зависимость между отношением сигнала–шума и систематической ошибкой.

The effect of noise on the accuracy of the phase method employed for detecting the arriving moment of acoustic pulses (acoustic pulse recording by using signal intersection through the zero level of the first half-wave) is considered. By using probabilistic simulation the probability density of measurement errors is found, and the relationship between the signal-to-noise ratio and the systematic error is established.

Ключевые слова: акустический импульс, фазовый способ, плотность распределения, первая полуволна.

Точность определения момента прихода акустических импульсов зачастую является ключевым элементом, определяющим основные метрологические характеристики различных приборов и систем. Ультразвуковые и акустические устройства неразрушающего контроля как активного, так и пассивного типов опираются на измерение момента прихода акустического импульса или их разности. К пассивным системам, которые используют данный тип измерений, можно отнести акустико-эмиссионные системы определения координат развивающихся дефектов в различных материалах и средах (металлах, бетоне, горных породах). Задача измерения момента прихода акустических импульсов широко распространена в активных ультразвуковых при-

борах толщинометрии, дефектоскопии, в ультразвуковых уровнемерах и в приборах ультразвуковой медицины [1].

Для определения времени прихода импульса необходимо «привязаться» к некоторой реперной точке, так, например, Гринлиф и другие [2] предлагают в качестве такой точки использовать первый момент времени, когда на фоне шумов появляется полезный сигнал. Боуэн и другие [3] регистрировали момент времени, когда сигнал впервые пересекает нулевую отметку (фазовый способ). В [4] предлагается регистрировать время перехода через нулевой уровень после регистрации амплитудным обнаружителем порогового уровня. Недостатком данного способа является эффект уширения импульса, который происходит за счет дисперсии скорости звука и зависимости коэффициента затухания от частоты. Однако этот эффект может быть учтен, если известны дисперсионные характеристики среды. В частности, для стержней авторами работы [4] показано, что уширение первой полуволны импульса линейно зависит от времени распространения и может быть рассчитано. При наличии шумов возникает дополнительная погрешность определения момента времени перехода сигнала через ноль. В данной работе оценивается влияние шумов на точность определения момента прихода акустических импульсов фазовым способом.

Решение данной задачи в аналитическом виде достаточно сложно. Для получения результата в данной работе использовались методы статистического моделирования процесса измерения времени прихода сигнала. При этом сигнал представлял собой аддитивную смесь детерминированного сигнала $S(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)$ в виде полуволны с изменением фазы в пределах $0 - \pi$ и случайного сигнала $n(t)$. За соотношение сигнала–шума примем величину $\gamma = A/\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение случайного шумового процесса. Для упрощения примем $A = 1$.

Для обеспечения линейного усиления сигналов в широком диапазоне амплитуд обычно полоса пропускания усилителей превышает диапазон частот входного сигнала. В качестве примера рассмотрим случай, когда основная частота детерминированного сигнала $F = 100$ кГц, верхняя граница спектра шумовой составляющей не превышает $1 \text{ МГц} = 10F$, а нижняя $0,03 \text{ МГц} = 0,3F$. Генерация стационарного случайного процесса $n(t)$ со спектральной плотностью в заданном диапазоне частот выполнялась в два этапа. Сначала формировался случайный процесс, имеющий нормальную плотность вероятности с нулевым средним значением [5, 6]:

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} x^2\right).$$

При этом каждое значение процесса формировалось усреднением 100 чисел, каждое из которых вырабатывалось генератором псевдослучайных



чисел с равномерным распределением вероятности на интервале $\pm 0,5$. Для проведения моделирования частота дискретизации была выбрана в 100 раз выше частоты верхней границы шумовой составляющей, что позволило получить «гладкую» функцию сигнала–шума на фоне основного сигнала (рис. 1). В соответствии с теоремой Котельникова для представления частоты 1МГц достаточно частоты дискретизации, равной $20F$, а учитывая вышесказанное, требуется частота дискретизации $2000F$. Таким образом, один период частоты $0,03F$ будет представлен более 6000 отсчетами. При таком представлении существенно возрастает порядок цифрового фильтра либо снижается качество фильтрации. Поэтому сначала была выполнена операция, формирующая низкочастотный срез частоты. Для этого был использован цифровой БИХ-фильтр, использующий частоту дискретизации $20F$ в соответствии с формулой [7]

$$y(n) = 0,93 \cdot x(n) - 1,87 \cdot x(n-1) + 0,93 \cdot x(n-2) + 1,86 \cdot y(n-1) - 0,87 \cdot y(n-2)$$

Промежуточные 100 дискретных значений случайного процесса были интерполированы посредством кубического сплайна, реализуемого по формуле

$$S_i(x) = a_i + b_i \cdot (x - x_i) + \frac{c_i}{2} \cdot (x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6} \cdot (x - x_i)^3.$$

Вид полученной реализации аддитивной смеси одного полупериода детерминированного сигнала и высокочастотного шума для $\gamma = 5$ приведен на рис.1.

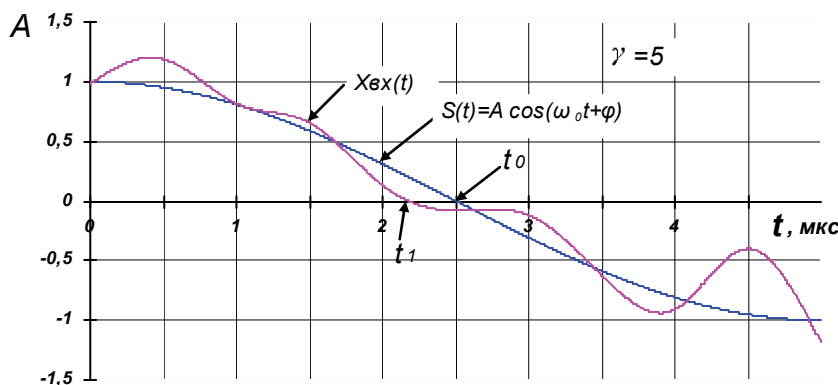


Рис. 1. Аддитивная смесь сигнала и высокочастотного шума

Как видно из рис. 1, переход сигнала $X(t)$ через нулевой уровень может произойти раньше или позже, чем амплитуда детерминированного сигнала

примет нулевое значение. Причем очевидно, что при уменьшении отношения сигнал шум γ вероятность перехода через нулевой уровень «слева» от t_0 будет выше, чем «справа» от t_0 . При этом время перехода сигнала $X(t)$ через нулевой уровень может изменяться случайно в пределах интервала $\Delta t_{об} = t_0 - t_1$, который в вероятностном смысле соответствует ошибке определения времени прихода импульса.

Результаты статистического моделирования представлены на рис. 2. По оси абсцисс указана фаза φ детерминированного сигнала, а по оси ординат плотность вероятности $W(\varphi)$ перехода сигнала $X(t)$ через ноль, что равноценно плотности вероятности ошибки определения момента прихода акустического сигнала. Переход от временной оси к фазовой позволяет использовать результаты моделирования для любых частот. Из рис. 2 видно, что плотность вероятности ошибки измерения при уменьшении γ «расплывается», а среднее значение смещается относительно $\varphi = 90^\circ$ в левую сторону. Кроме того, при малых значениях γ функция $W(\varphi)$ принимает «волновой» характер. Данный эффект объясняется ограничением верхней частоты шумовой составляющей.

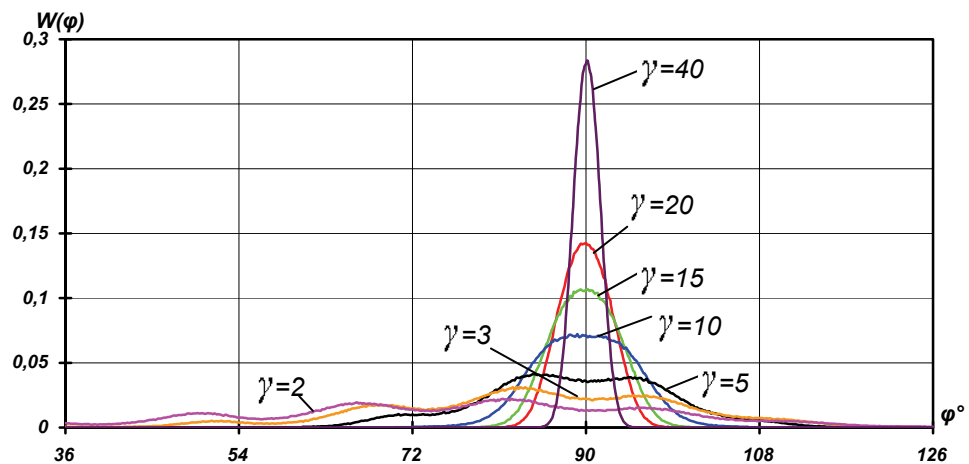


Рис. 2. Плотности вероятности ошибки определения момента прихода акустического сигнала

Для проверки этого эффекта была разработана вероятностная модель устройства измерения длительности времени τ от произвольного момента его включения до первого пересечения сигналом $n(t)$ порога $C = \sigma$.

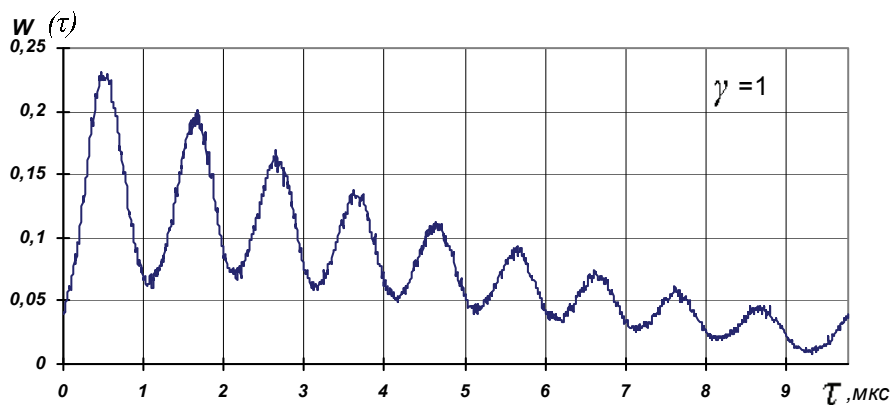


Рис. 3. Плотность вероятности времени τ для $X(t) = n(t)$

На рис. 3 представлена плотность вероятности длительности импульса, регистрируемого этим устройством. На рис. 3 отчетливо видна периодическая составляющая с периодом 1 мкс, что соответствует верхней границе спектра сигнала шума в 1 МГц.

В результате статистического моделирования были получены графики зависимостей среднего значения ошибки измерения момента прихода $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$ от отношения сигнала–шума для $\Delta\varphi = \varphi - 90^\circ$.

В современных измерительных системах легко реализуется алгоритм измерения отношения сигнала–шума как отношения амплитуды первой полуволны к среднему значению шумовой составляющей до момента обнаружения акустического импульса. В процессе каждого измерения момента прихода импульса можно рассчитать величину $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$ и добавить это значение к результату в виде поправки, приняв ее за систематическую ошибку, зависящую от γ . Таким образом, в автоматическом режиме можно корректировать показание измерения, в результате чего повышается точность работы прибора.

Результаты моделирования были использованы при проектировании и создании приборов активного типа: высокоточного ультразвукового уровнемера в составе комплекса сбора гидрогеологической информации «Кедр-Дм» [4] и толщиномера «Калина Т01» (разработка ООО НПФ «Полином» г. Хабаровск). Кроме того, вышеописанный метод повышения точности определения момента прихода акустических импульсов был реализован в цифровом приемнике акустико-эмиссионной системы контроля горных ударов АСКГД "Prognoz-ADS" [8].

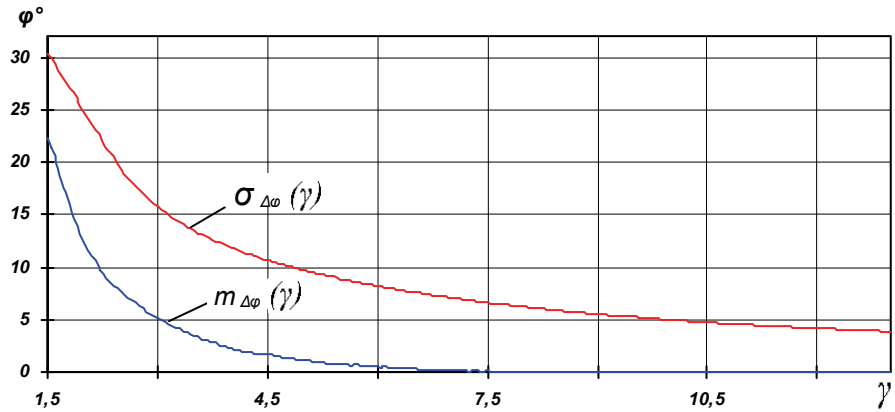


Рис. 4. График зависимостей $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$ и $\sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$

На рис. 5 и 6 представлены схема и диаграмма работы устройства фазового обнаружения момента времени прихода первой полуволны через нулевой уровень.

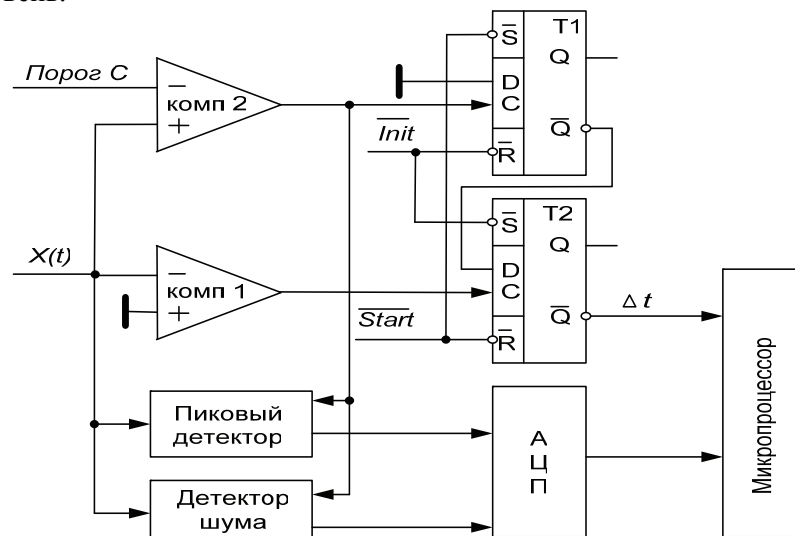


Рис. 5. Схема двойного компаратора фазового измерителя

Работа, представленной выше схемой, заключается в следующем. В отсутствие акустических импульсов детектор шума непрерывно измеряет уровень шума, детектируя и интегрируя сигнал $X(t)$. Время интегрирования выбирается из условия стационарности входного шума. При этом компаратор 1 непрерывно формирует сигналы синхронизации для триггера T2 в моменты времени, когда $X(t)$ пересекает нулевой уровень сверху вниз. После начала



измерения временного интервала в момент формирования сигнала «start» триггер Т1 переходит в режим ожидания. При превышении первой полуволны напряжение порога С срабатывает компаратор 2, который блокирует работу детектора шума, разрешает работе пикового детектора и триггера 2. Аналого-цифровой преобразователь преобразует максимальное напряжение первой полуволны пикового детектора и уровень шума в цифровой код, который поступает в микропроцессор. На основании этих измерений в соответствии с предложенным методом к измеренному интервалу Δt прибавляется рассчитанное значение $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$. Сигналом «init» схема переходит в исходное состояние.

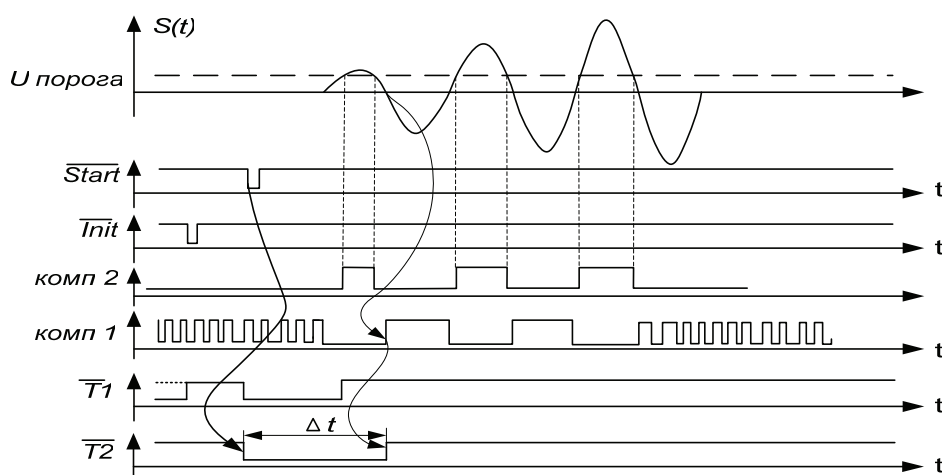


Рис. 6. Диаграмма работы схемы фазового измерителя

В высокоточном ультразвуковом уровнемере осуществляется пятикратное измерение и усреднение времени распространения ультразвуковых волн от поплавкового излучателя до приемника ультразвука. Это позволяет в $\sqrt{5}$ раз уменьшить $\sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$. Так как уровень сигнала в измерительной системе изменяется в широких пределах (до 40 дБ), то компенсация систематической составляющей погрешности на основе вышеизложенного метода позволяет уменьшить погрешность измерения в 1,5 раза.

Более существенный выигрыш в точности удается получить в приборах с многократным измерением. В ультразвуковом толщиномере «Калина Т01» одно показание вычисляется усреднением 128 измерений, т. е. $\sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$ уменьшается в 11,3 раза. Таким образом, например, когда $\gamma = 5$, значение систематической ошибки составляет $m_{\Delta\varphi}(5) = 0,86^{\circ}$, а $\sigma_{\Delta\varphi}(5) = 9,76^{\circ}$. После усреднения $\sigma_{\text{вср}}(5) = 0,86^{\circ}$. Устранение систематической ошибки в автоматическом режиме позволяет увеличить точность 2,26 раза.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Смещение среднего значения ошибки измерения момента прихода импульса фазовым методом $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$, возникающего в результате воздействия широкополосного шума, эквивалентно влиянию на измерительную систему систематической ошибки.

2. Для исключения данной систематической ошибки необходимо: измерить амплитуду первой полуволны, вычислить соотношение сигнала–шума, определить величину ошибки как функцию $m_{\Delta\varphi}(\gamma)$ и прибавить к имеющемуся результату (см. рис. 4).

3. Компенсация систематической ошибки имеет смысл тогда, когда $m_{\Delta\varphi}(\gamma) > 0,2 \sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$. При однократных измерениях систематическая ошибка оказывает существенное влияние при отношении сигнала–шума $\gamma < 5$.

4. Эффективность применения рассматриваемого метода существенно выше для активных акустических устройств измерения, в работе которых заложен аппарат усреднения, так как усреднение уменьшает значение $\sigma_{\Delta\varphi}(\gamma)$ в \sqrt{N} раз.

Библиографические ссылки

1. *Миллер, Хилл К., Бэмвер Дж.* Применение ультразвука в медицине физические основы. М., 1989.
2. Two dimensional acoustic velocity distribution in tissues using an algebraic reconstruction technique. *Greenleaf J. F., Johnson S. A., Samayoa W. F., & Duck F. A.* Ultrasonics Int. Conf. Proc., IPC Science and Technology Press, Guildford, 1975.
3. Measurement of the temperature dependence of the velocity of ultrasound in tissues. Ultrasonic tissue characterization II. *Bowen T., Conner W., G., Nasoni R. L., Pifer A. E. & Sholer R. R.* Linzer, M. (ed) U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. NBS Special Publication 525, 1979.
4. *Методы диагностики и контроля динамических объектов / В. И. Римлянд, А. И. Кондратьев, Г. А. Калинов, А. В. Казарбин.* Хабаровск, 2006.
5. *Горянов Т. Г., Журавлев А. Г., Тихонов В. И.* Примеры и задачи по статистической радиотехнике. М., 1970.
6. *Левин Б. П.* Теоретические основы статистической радиотехники М., 1989.
7. *Каппелини В., Константинодис А. Дж., Эмилиани П.* Цифровые фильтры и их применение. М., 1983.
8. *Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / И. Ю. Рассказов, Г. А. Калинов, А. Ю. Искра, Д. А. Куликов, К. О. Харитонов // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика. М., 2005.*