

УДК 620.179.16

Е.В. Монченко, Е.С. Мельник

Национальный авиационный университет, Киев

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

В статье рассмотрен способ уменьшения методической погрешности при определении дискретных характеристик сигналов ультразвукового контроля с помощью использования оконной обработки.

**Ключевые слова:** методическая погрешность, фазовая характеристика сигнала, оконная обработка.

### Введение

В связи с возникновением новых конструктивных материалов возникает необходимость прецизионного измерения их толщины. Существуют различные группы факторов, влияющих на результаты исследований процесса ультразвукового измерения толщины изделий [1]. В частности, к таким факторам относятся параметры исследуемых сигналов (продолжительность и форма импульсов, частота несущей, и другие) и режимов сбора информации (тип и продолжительность окна, время дискретизации, время анализа, период квантования и другие). Для уменьшения влияния этих факторов на точность измерения необходимо согласовать данные параметры между собой.

### Постановка задачи

В общем виде во время анализа сигналов, особенно со сложными амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) и фазочастотными характеристиками (ФЧХ), методическая погрешность может быть уменьшена за счет использования оконной обработки сигналов. Однако, такое использование оконной обработки не охватывает всех возможных способов уменьшения методической погрешности. Для гармонических и полигармонических сигналов, которые используются в задачах исследования широкого класса физических явлений и процессов, существует возможность существенного уменьшения методической погрешности за счет согласования периодов сигналов ( $T$ ) и дискретизации ( $T_D$ ).

### Решение поставленной задачи

Рассмотрим способ уменьшения методической погрешности на примере модельного гармонического сигнала с частотой  $f = 1$  Гц

$$u(t) = \sin(2\pi ft), \quad t \in [0, 3] \text{ с}, \quad (1)$$

время наблюдения которого больше периода сигнала ( $T_C \gg T$ ).

На конечном интервале времени исследуется гармонический сигнал вида (1). Интервал времени

наблюдения рассчитывается так, чтобы на каждый период сигнала  $T$  приходилось одинаковое количество отсчетов. Исследование проводится для трех разных значений общего количества отсчетов  $N$  на времени наблюдения  $T_C$

$$N = T \cdot T_D^{-1}. \quad (2)$$

Фазовая характеристика  $\Phi_0(t)$  для данного сигнала  $u(t)$  известна:  $\Phi_0(t) = 2\pi ft$ ,  $t \in [0, 3]$  с. Измеренная фазовая характеристика сигнала (ФХС) [2] вводится на основе преобразования Гильберта (ПГ) [3]:

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = \text{v.p.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\pi(\tau - t)} d\tau$$

и гильберт-образе сигнала  $\hat{u}(t) = \mathbf{H}[u(t)]$  для разных  $N$ .

Следующим шагом является расчет методической погрешности определения ФХС для разных значений  $N$  по формуле:

$$\Delta\phi(t) = \Phi(t) - \Phi_0(t), \quad t \in [t_{\Pi}, t_K]$$

и ее анализа согласно из формулы:

$$K(t) = \Delta\phi_{\Pi}(t), \quad t \in [t_{\Pi}, t_K],$$

где  $\Delta\phi_{\Pi}(t)$  – методическая погрешность определения ФХС произведения исходящего сигнала с прямоугольным окном.

Для проверки полученных соотношений было проведено моделирование в системе Matlab.

Параметры моделирования следующие: амплитуда сигнала  $U = 1$  В,  $f = 1$  Гц,  $\phi = 0$ ,  $T_C = 3$  с,  $T_D = 10^{-2}$  с, при  $N_1=300/3$ ,  $N_2 = 299/3$ ,  $N_3 = 301/3$ .

Примеры графиков функций  $\Delta\phi(t)$  изображены на рис. 1.

По результатам анализа полученных данных установлено, что в случае целочисленного значения  $N$  методическая погрешность практически исчезает, например, для  $N = 100$  эта погрешность не превышала бы  $10^{-15}$ .

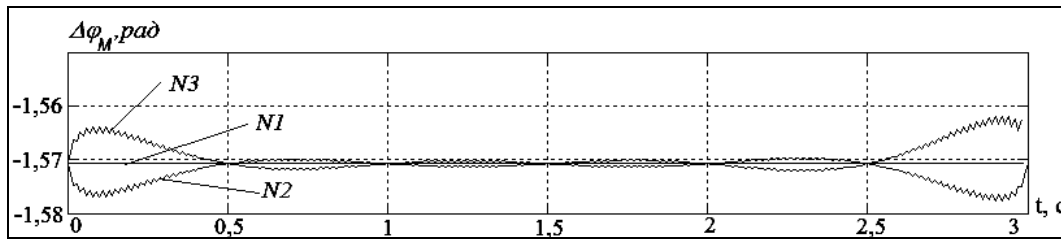


Рис. 1. График функции  $\Delta\phi_M(t)$

То есть, если  $N$  принадлежит натуральному ряду чисел, точность определения ФХС ограничивается только точностью полученных значений отчетов сигналов, которая определяется разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и его аппаратными погрешностями, а при увеличении или уменьшении  $N$  хотя бы на 1 точность определения ФХС значительно уменьшается. То есть при наложении на сигнал прямоугольных окон согласованной со значением  $T$  продолжительности методическая погрешность уменьшается.

Аналогичные результаты наблюдаются при увеличении частоты сигнала до десятков МГц и при увеличении времени наблюдения сигнала.

Такой же эффект наблюдается и при наложении скользящего окна на исследуемый сигнал. При согласовании длительности окна, параметров его движения и времени дискретизации существует возможность минимизировать методическую погрешность определения ФХС.

Однако во время проведения реальных физических экспериментов поддержание целочисленного отношения между  $T/T_D$  является проблематичным в результате дрейфа частот сигналов и неконтролируемых случайных изменений режимов сбора информации.

Ниже приведены результаты сравнительного анализа данных измерений ФХС для гармонического сигнала со скользящей оконной обработкой и без оконной обработки.

Для гармонического сигнала вида

$$u(t) = \begin{cases} U(t)\cos(2\pi ft + \phi), & t \in [t_{\Pi}, t_K], \\ 0, & t \notin [t_{\Pi}, t_K], \end{cases}$$

заданы следующие параметры:  $N = 2000$ ,  $T_D = 0,01$  с,  $U = 1$  В,  $f = 4$  Гц,  $\phi = 0$ , график сигнала показан на рис. 2.

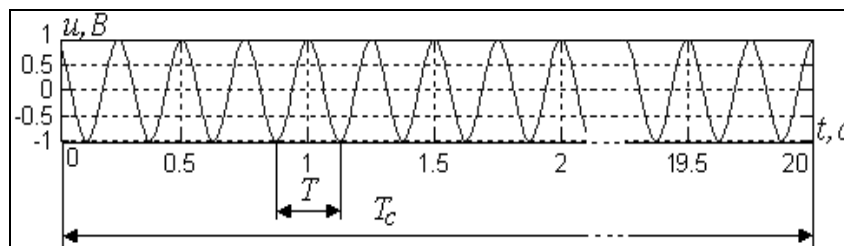


Рис. 2. График исследуемого сигнала

Используем окно Чебышева с параметрами:

$$M = 200,$$

$$\beta = 90,$$

продолжительность окна

$$T_W = MT_D \gg T.$$

Для уменьшения методической погрешности для каждого положительного окна, как более достоверный результат выбираем значение с центральной части окна длительностью  $st = 10$ .

Величина  $st$  определяется по формуле:

$$u[j] = U \cos(2\pi f T_D j + \phi),$$

$$j = \overline{1, n}, \quad n T_D = T_C.$$

На рис. 3, а изображен график дробной части фазы исследуемого сигнала  $\Phi[j](\text{mod } 2\pi)$  и развернутой фазы  $\Phi[j]$  (рис. 3, б).

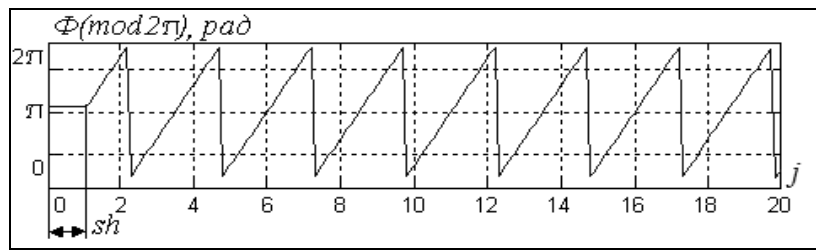
График  $\Phi[j]$  получен из  $\Phi[j](\text{mod } 2\pi)$  с помощью ступенчатой числовой функции  $L[j]2\pi$ , которая определяется по результатам анализа скачков этой функции.

Зависимость методической погрешности определения ФХС от  $st$  приведена на рис. 4.

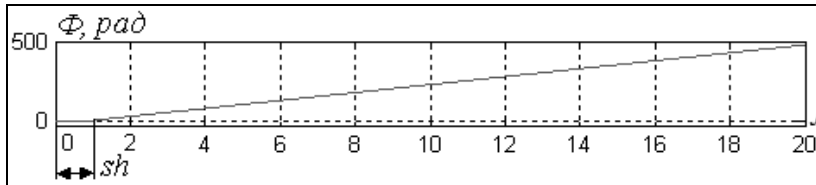
Величиной  $st$  можно в определенных границах корректировать значение  $\Delta\phi_M[j]$  и задавать ее допустимый уровень.

Следует заметить, что согласование параметров сигналов и режимов сбора данных можно совершать двумя путями: по количеству отсчетов и по числу периодов.

В первом случае согласовывается количество отсчетов в выборке исследуемого сигнала с длительностью окна в отсчетах, во втором случае согласовывается количество периодов в исследуемом сигнале и длительность окна в периодах.



а



б

Рис. 3. Графики фазовой характеристики сигнала исследуемого сигнала:  
а – дробная часть ФХС; б – развернутая ФХС

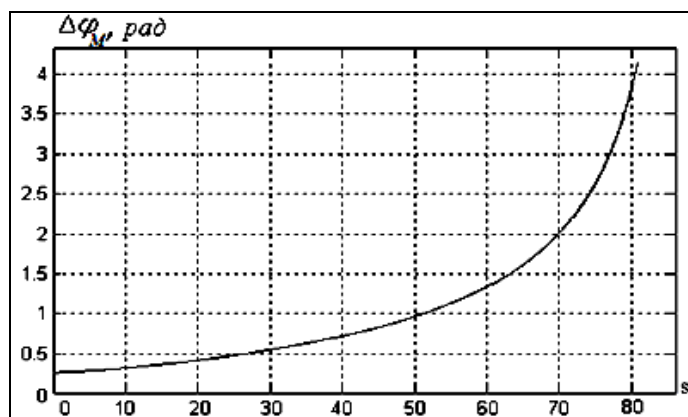


Рис.4. Зависимость  $\Delta\varphi_M [j]$  от величины  $st$  для  $T_W = 200$

## Выводы

В работе рассмотрен способ уменьшения методической погрешности за счет согласования периодов сигналов и дискретизации на примере гармонического сигнала. Для проверки полученных соотношений было проведено моделирование в системе Matlab. В работе представлены результаты сравнительного анализа данных измерений ФХС для гармонического сигнала со скользящей оконной обработкой (окном Чебышева) и без оконной обработки. Полученные результаты могут быть использованы для разработки прецизионной аппаратуры для ультразвуковой толщинометрии.

## Список литературы

1. *Незрушаючий контроль и диагностика : справочник* / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с
2. Куц Ю.В. *Статистична фазометрія* / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: В-во Терноп. технологіч. ун-ту, 2009. – 383 с.
3. Бендат Дж. *Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ.* / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Поступила в редколлегию 21.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Ю.В. Куц, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

О.В. Монченко, О.С. Мельник

*У статті розглянутий спосіб зменшення методичної погрешності при визначенні дискретних характеристик сигналів ультразвукового контролю за допомогою використання віконної обробки.*

**Ключові слова:** методична погрешність, фазова характеристика сигналу, віконна обробка.

## DETERMINATION OF THE DISCRETE CHARACTERISTICS OF ULTRASONIC TESTING SIGNALS

O.V. Monchenko, O.S. Melnyk

*The article describes the method of reducing the systematic error in the determination of the discrete characteristics of ultrasonic testing signals by using window treatment.*

**Keywords:** systematic error, the phase characteristics of the signal, the window treatment.