

## ФАЗОВЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СИГНАЛОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е. Д. БЛИЗНЮК, В. С. ЕРЕМЕНКО, Ю. В. КУЦ, И. Н. БЫСТРАЯ, Е. В. МОНЧЕНКО (Нац. авиационный ун-т, г. Киев),  
В. К. ЦАПЕНКО (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

*Предложен фазовый обнаружитель сигналов ультразвукового неразрушающего контроля, реализующий метод обработки, основанный на анализе круговых статистик фазовых характеристик сигналов. В обнаружителе предусмотрена возможность оценки достоверности выявления сигналов. Разработанное в среде MATLAB программное обеспечение, реализующее процесс обработки сигналов в обнаружителе, может быть использовано как отдельная программа, так и в составе средств ультразвуковой дефектоскопии.*

*Phase detector of signals of ultrasonic nondestructive testing is proposed, which realizes the processing method based on analysis of circular statistics of signal phase characteristics. The detector provides the possibility of evaluation of signal detection validity. Developed in MATLAB environment software realizing signal processing in the detector, can be used both independently, and as part of ultrasonic flaw detection means.*

Обеспечение контроля качества новых конструкционных материалов и изготавливаемых из них изделий требует поиска новых и совершенствования известных методов неразрушающих испытаний, способов получения и обработки информационных сигналов. Это в полной мере относится и к исследованию композиционных материалов [1], которые в процессе производства и эксплуатации испытываются на наличие расслоений, трещин, непрочесов, участков нарушения адгезии и т. п. Одним из методов, которые применяются для решения данных задач, является метод ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) [2].

Значительные затухания сигналов УЗНК при их распространении в композиционных материалах, необходимость определения дефектов малых размеров на стадиях зарождения и развития, а также влияние на информационные сигналы помех разнообразного характера, приводит к уменьшению уровня информационных сигналов и, соответственно, уменьшению соотношения сигнал/шум (С/Ш), что усложняет реализацию УЗНК.

Для обнаружения информационных сигналов и оценки их параметров при низком соотношении С/Ш используют различные подходы, включающие использование тестовых сигналов с разными видами модуляции и манипуляции, согласованной фильтрации информационных сигналов, корреляционных методов приема сигналов [3].

Волновой характер распространения УЗ колебаний при НК материалов и изделий [1] обуславливает возможность применения методов и средств фазометрии с целью повышения достоверности и надежности контроля. За счет использования статистических методов обработки результатов фазовых измерений в УЗ дефектоскопии можно обнаруживать сигналы, которые отражаются от де-

фектов малых размеров, значительно затухают, распространяясь в объектах контроля, и повысить чувствительность УЗ дефектоскопов. В работах [4,5] обоснована возможность и проведен теоретический анализ вероятности выявления сигналов УНК при отношении С/Ш, равному единице и меньше на основе анализа дисперсии разности фазовых характеристик анализируемых сигналов.

Целью данной статьи является разработка и анализ работы фазового обнаружителя сигналов УЗНК на основе использования метода статистической фазометрии [6], что позволит обнаруживать дефекты с малой отражающей способностью при соотношении С/Ш, близкому к единице и менее.

**Постановка задачи.** Анализируемый сигнал УЗНК представляется суммой информационной составляющей в виде радиоимпульса с гауссовой огибающей и аддитивного гауссового шума вида:

$$u_c(t) = U(t) \sin(2\pi f(t - \tau_c)) + \xi(t), t \in [0, T_A], \quad (1)$$

где  $U(t)$  — огибающая радиоимпульса с максимальным значением  $U_m$ ;  $f$  — частота несущего сигнала;  $t$  — время;  $T_A$  — длительность радиоимпульса ( $T_A > f^{-1}$ );  $\tau_c$  — задержка радиосигнала относительно начального момента времени;  $\xi(t)$  — реализация гауссового шума с дисперсией  $\sigma^2$  и нулевым математическим ожиданием.

Сигнал (1) представлен выборкой значений  $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$  в дискретные моменты времени  $jT_d$

( $T_d$  — период дискретизации),  $N = \left[ \frac{T_A}{T_d} \right]^+$  — объем выборки,  $[ ]^+$  — обозначение целой части числа.

Необходимо предложить фазовый обнаружитель радиосигналов и оценить вероятность их вы-

явления при соотношении  $C/\text{Ш} = U_m/\sigma$  близком к единице.

**Решение поставленной задачи.** Выявление радиоимпульса на фоне аддитивной помехи с целью оценки его временного положения выполняются на основе определения и анализа фазовой характеристики сигнала (1) [4, 5].

Дискретная фазовая характеристика сигнала (ФХС) определяется с помощью дискретного преобразования Гильберта анализируемого сигнала  $\hat{u}[j] = \mathbf{H}(u[j])$ , где  $\mathbf{H}$  — оператор дискретного преобразования Гильберта.

Дробная (определяемая однозначно в интервале  $[0, 2\pi)$ ) часть дискретной ФХС вычисляется в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} \varphi[j] &= \Phi(\hat{u}[j], u[j]) = \\ &= \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} [2 - \text{sign}(\hat{u}[j])(1 + \text{sign}(u[j]))], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\text{sign}(\cdot)$  — обозначение знаковой функции;  $\Phi$  — оператор вычисления дробной части дискретной ФХС.

В интервале  $[0, 2\pi)$  разница дискретных ФХС (2) и фазы гармонического сигнала с несущей частотой  $f$  определяется как:

$$\Delta\varphi[j] = (\varphi[j] - (2\pi f j T_d)) \pmod{2\pi}, j = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Обозначим  $a = (\varphi[j] - (2\pi f j T_d))$ , тогда  $a \pmod{2\pi}$  — операция вычисления остатка от деления числа  $a$  на  $2\pi$ .

Из статистической фазометрии известно [6], что оценкой рассеивания значений  $\Delta\varphi$  есть круговая выборочная дисперсия  $V = 1 - r$  или однозначно связанная с ней выборочная длина суммарного вектора  $r$ . Признаком присутствия радиосигнала является превышение статистикой  $r \in (0, 1]$  некоторого порога  $\Pi$ , что используется для выделения радиосигналов на фоне помех.

Структура фазового обнаружителя, реализующего данный принцип работы, приведена на рис. 1, где показаны блоки, реализующие операторы:  $\mathbf{H}$  — дискретного преобразования Гильберта;  $\Phi$  — вычисления дробной части дискретной ФХС;  $\Sigma$  — вычитания;  $\mathbf{W}$  — оконной обработки;

$\mathbf{R}$  — вычисления текущего значения статистики  $r$ ;  $\Phi\Pi$  — формирования порогового значения  $\Pi$ .

Определение текущего значения статистики  $r$  выполняется после оконной обработки выборки  $\{\Delta\varphi[j], j = \overline{1, J}\}$  окном прямоугольной формы с апертурой  $M_w$ . Окно обеспечивает отбор части значений  $\Delta\varphi[j]$  в скользящем режиме на интервале времени кратном  $f^{-1}$ :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi[k, M_w] &= \{ \Delta\varphi[k], k \in j - \frac{M_w - 1}{2}, j + \frac{M_w - 1}{2}, \\ & j \in \frac{M_w - 1}{2}, N - \frac{M_w - 1}{2} \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Предполагается, что в этом выражении значение  $M_w$  нечетное, а  $T = JT_d$ .

Текущее значение выборочной длины суммарного вектора определяется как

$$r[j, M_w] = \sqrt{C^2[j, M_w] + S^2[j, M_w]}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} C[j, M_w] &= \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} \cos \Delta\varphi[k, M_w]; \\ S[j, M_w] &= \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} \sin \Delta\varphi[k, M_w]. \end{aligned} \quad (6)$$

Признаком наличия в анализируемой выборке радиосигнала является превышение статистикой  $r$  определенного порога  $\Pi \in (0, 1)$ . Выходной сигнал обнаружителя будет:

$$P[j, M_w] = \begin{cases} 1, & r[j, M_w] > \Pi, \\ 0, & r[j, M_w] \leq \Pi. \end{cases} \quad (7)$$

Значение порога  $\Pi$  выбирается с учетом заданных уровней ошибок обнаружения первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода и текущих параметров статистики  $r$ . В работе [5] показано, что как для гауссового шума, так и для его аддитивной смеси с гармоническим сигналом статистика  $r$  подчиняется бета-распределению [7] с плотностью вероятности:

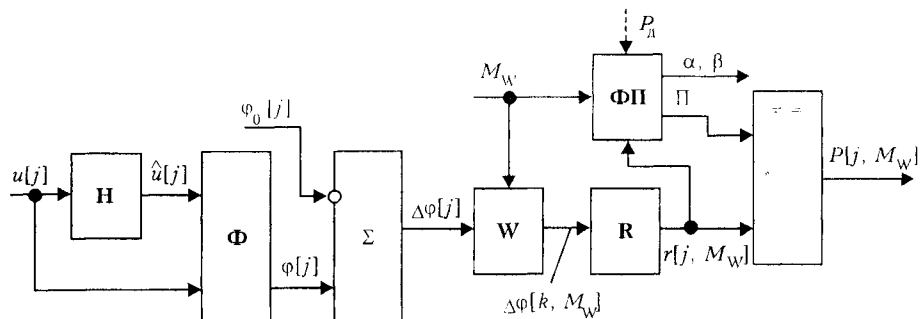


Рис. 1. Структура фазового обнаружителя

$$p(x) = \frac{1}{B(a,b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}, x \in [0,1], a \geq 1, b \geq 1, \quad (8)$$

где  $B(a, b)$  — бета-функция;  $a, b$  — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием  $M_r$  и дисперсией,  $D_r$  статистики  $r$  выражениями:

$$a = \frac{M_r^2 (1 - M_r)}{D_r} - M_r, \quad (9)$$

$$b = a \frac{1 - M_r}{M_r}.$$

Примеры графиков плотностей вероятности бета-распределения статистики  $r - p(r/\text{Ш})$  и  $p(r/C)$  соответственно для гауссового шума (Ш) и его аддитивной смеси (С) с гармоническим сигналом и указанными ошибками первого и второго рода приведены на рис. 2. Значения ошибок первого и второго рода определяются соответственно, интегральными выражениями:

$$\alpha = \int_0^{\Pi} p(r/C) dr, \quad \beta = \int_{\Pi}^1 p(r/\text{Ш}) dr. \quad (10)$$

В приведенном на рис. 2 примере значение  $\Pi$  выбрано из условия равенства  $p(r/\text{Ш}) = p(r/C)$ .

Блок ФП определяет текущие оценки математического ожидания и дисперсии статистики  $r$  в соответствии с выражениями:

$$\hat{M}_r [j] = \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0.5(M_w-1)}^{j+0.5(M_w-1)} r[k, M_w], \quad (11)$$

$$\hat{D}_r [j] = \frac{1}{M_w - 1} \sum_{k=j-0.5(M_w-1)}^{j+0.5(M_w-1)} (r[k, M_w] - \hat{M}_r [j])^2,$$

которые необходимы для расчета параметров распределения (9) и оценки текущих значений ошибок

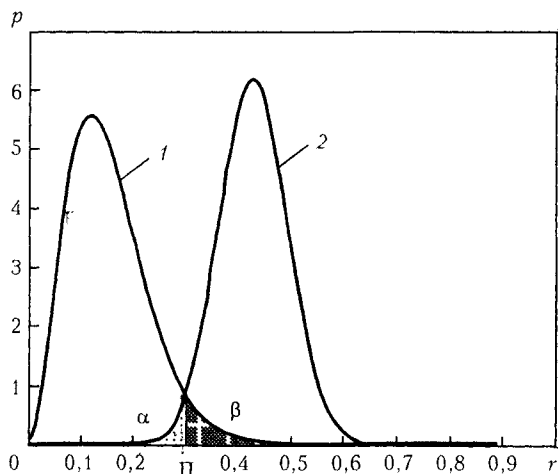


Рис. 2. Плотности вероятности  $p(r/\text{Ш})$  (кривая 1) и  $p(r/C)$  (кривая 2) статистики  $r$  соответственно для гауссового шума и его суммы с гармоническим сигналом

первого и второго рода (10), а также значения достоверности обнаружения сигнала и его сравнения с заданным граничным значением  $P_d$ . Достоверность обнаружения сигнала контролируется следующим образом. При заданном (или определенном в отсутствии сигнала в соответствии с формулами (8)–(11) значении  $\beta$  определяется текущее значение  $\alpha[j]$ , что позволяет проверить неравенство  $1 - \alpha[j] - \beta \geq P_d$ . Выполнение этого неравенства свидетельствует об обнаружении сигнала с заданной достоверностью.

Проверка работоспособности разработанного обнаружителя сигналов УЗНК выполнялась с помощью моделирования в среде MATLAB.

**Результаты моделирования.** Моделирование процесса выявления радиосигнала было выполнено для следующих параметров сигнала:  $U = 1$ ,  $f = 5$  кГц,  $N = 6000$ ,  $T_d = 2$  мкс,  $t_3 = 2$  мкс (10 мкс),  $T_A = 12$  мс,  $C/\text{Ш} = 1$ ,  $M_w = 100$ .

Сформированная выборка анализируемого сигнала  $\{u[j], j = 1, N\}$  с заданными параметрами, полученная оценка текущего значения статистики  $r$  и выходной сигнал обнаружителя представлены соответственно на рис. 3.

На рис. 3, а изображены графики сигнала (кривая 1) и его информационной составляющей (кривая 2), а на рис. 3, в — выходной сигнал обнаружителя, полученный в соответствии с (7) для  $\Pi = 0,4$ .

Рассчитанные по формулам (11) математическое ожидание и дисперсия статистики  $r$  на участках, где есть радиосигналы с гауссовой огибающей (рис. 3, б), составляют соответственно

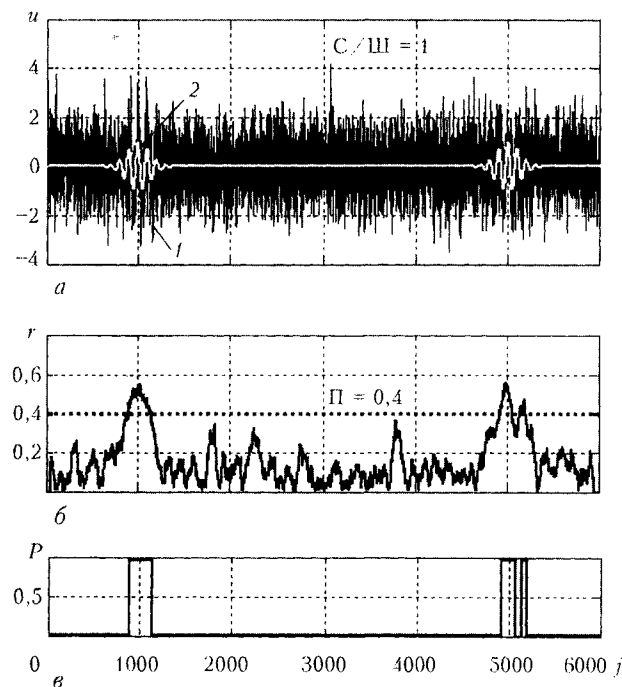


Рис. 3. Графики функций  $u[j]$  (а),  $r[j]$  (б) и  $P[j]$  (в)

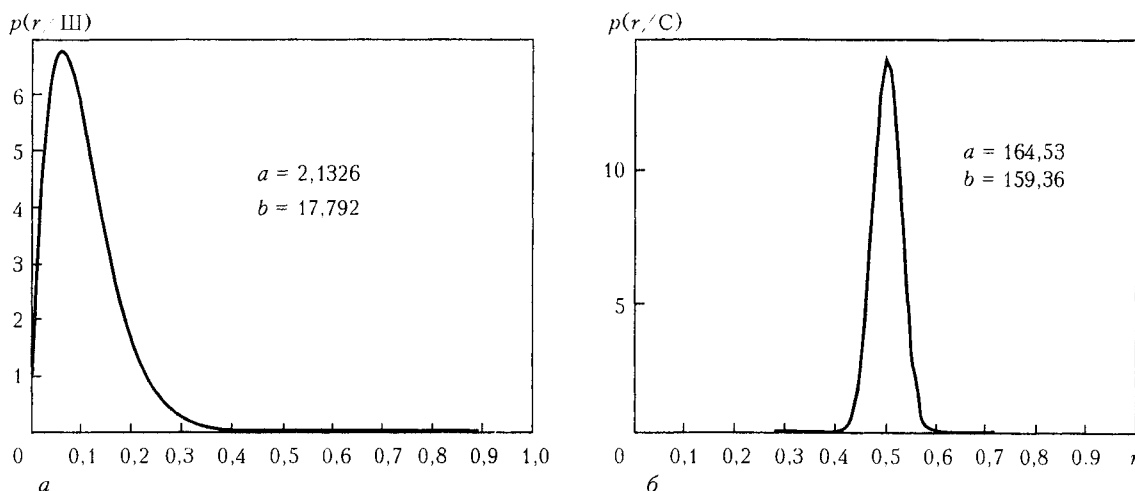


Рис. 4. Графики плотностей вероятности  $p(r/\text{Ш})$  (а) и  $p(r/С)$  (б) для расчетных значений параметров бета-распределения

$M_{r,C} \approx 0,508$  и  $D_{r,C} \approx 0,00077$ , а на участках без радиосигналов  $M_{r,\text{Ш}} \approx 0,107$  и  $D_{r,\text{Ш}} \approx 0,00457$ . Для этих значений рассчитанные параметры бета-распределения (9) составили: для участков без радиоимпульсов  $a = 2,1326$  и  $b = 17,792$ ; для участков с радиоимпульсами  $a = 164,53$  и  $b = 159,36$ . Графики соответствующих плотностей вероятности приведены на рис. 4. Анализ этих графиков позволяет обоснованно выбрать значение порога  $\Pi \in (0,3, 0,45)$  и выявлять радиосигналы на фоне значительных помех.

Последующее снижение соотношения С/Ш приводит к уменьшению  $M_{r,C}$  и увеличению его среднеквадратичного отклонения, что усложняет процесс выявления радиосигналов. Увеличение апертуры окна  $M_W$  позволяет несколько уменьшить  $M_{r,\text{Ш}}$  и  $D_{r,\text{Ш}}$  и, соответственно, уменьшить значение порога  $\Pi$  при сохранении заданного уровня ошибок  $\beta$ , за счет чего сохранить заданную достоверность обнаружения сигналов.

Предложенный фазовый обнаружитель радиосигналов может быть использован в прецизионной аппаратуре УЗНК. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение, реализующие рассмотренный метод обработки информационных сигналов, может быть использовано как самостоятельно, так и в составе средств ультразвуковой дефектоскопии.

### Выводы

Разработан и исследован фазовый обнаружитель радиосигналов с гармонической несущей, предназначенный для их выявления на фоне аддитивного гауссового шума. Его работа основана на оценке круговых статистик, полученных для фазовых характеристик сигналов УЗНК. Предложенный обнаружитель позволяет решать задачу выявления сигналов УЗНК при соотношении С/Ш, равном

единице и менее и одновременно контролировать достоверность этого процесса, что существенно для выявления незначительных по размеру дефектов на этапах их зарождения и развития.

Разработанное в среде MATLAB программное обеспечение, реализующее процесс обработки сигналов в фазовом обнаружителе, может быть использовано как отдельная программа, так и в составе средств УЗ дефектоскопии.

Фазовый обнаружитель пригоден для применения при бесконтактном вводе УЗ волн в объект контроля, а также для контроля материалов, которые характеризуются значительным затуханием, неоднородностью и анизотропией.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довід. посіб. / Під ред. В. В. Панасюка. — Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів і елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. — Львів: Сполом, 2007. — 1068 с.*
2. *Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. — Київ: НТУУ «КПІ», 2010. — 448 с.*
3. *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів / В. К. Качанов, О. В. Мозговий, О. І. Пітолін та ін. — Навч. посібник / За ред. В. П. Бабака. — Київ: ІСДО, 1994. — 132 с.*
4. *Пат. України на корисну модель № 35057. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю. В. Куц, В. С. Єременко, О. В. Монченко, І. М. Лапіга. — Опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.*
5. *Анализ достоверности обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на основе использования метода статистической фазометрии / Е. Д. Близнюк, В. С. Єременко, Ю. В. Куц, І. Н. Лапіга // Мат. Семнадцатой междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2009. — С. 73–76.*
6. *Куц Ю. В., Щербак Л. М. Статистична фазометрія. — Тернопіль: Терноп. дѣрж. техн. ун-т, 2009. — 383 с.*
7. *Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. — М.: Статистика, 1980. — 95 с.*

Поступила в редакцию  
26.01.2011