

УЛУЧШЕНИЕ ВИДИМОСТИ ГЛУБОКИХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ТОЛСТОСТЕННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ

© 2025 г. Чаолей Чэнь¹, Хуайшу Хоу^{2,*}, Шивэй Чжан¹, Мингсу Су^{1,**},
Чжифань Чжао², Чаофэй Цзяо²

¹Шанхайский университет науки и техники, Шанхай, 200093 Китай

²Шанхайский технологический институт, Шанхай, 201418 Китай

E-mail: *hhs927@126.com; **sumx@usst.edu.cn

Поступила в редакцию 21.11.2024; после доработки 01.01.2025

Принята к публикации 10.01.2025

Ультразвуковой контроль толстостенных полиэтиленовых труб сопряжен с проблемой потери энергии, что приводит к появлению слабых эхосигналов от глубоких дефектов. Чтобы улучшить обнаружение этих слабых сигналов, представлен метод концентрации энергии во времени и частоте. Дробное адаптивное суперлетное преобразование объединяет результаты нескольких вейвлет-преобразований с различными полосами пропускания путем геометрического усреднения, обеспечивая более широкие возможности анализа временных частот по сравнению с одиночными вейвлет-преобразованиями. Однако его представление временных частот имеет проблему мгновенного отклонения частоты. Предлагаемый метод решает эту проблему путем вложения мгновенной частоты, что приводит к повышению точности оценки мгновенной частоты. Численный анализ сигналов показывает более высокую точность оценки мгновенной частоты с помощью этого метода по сравнению с другими методами обработки временных частот. Применительно к обнаружению глубоких дефектов в толстостенных полиэтиленовых трубах метод показывает увеличение способности усиления слабого сигнала на 18,9 % по сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием. Наконец, результаты демонстрируют точность метода в определении мгновенных изменений частоты и усилении мгновенных амплитуд слабых сигналов, предлагая перспективный подход для обнаружения глубоких дефектов в толстостенных полиэтиленовых трубах.

Ключевые слова: глубокий дефект, слабый сигнал, ультразвуковое обнаружение, дробное адаптивное суперлетное преобразование, мгновенная частота.

ENHANCING DEEP HOLE DEFECTS VISIBILITY IN ULTRASONIC DETECTION FOR THICK-WALLED POLYETHYLENE PIPES VIA TIME- FREQUENCY ENERGY CONCENTRATION

© 2025 Chaolei Chen¹, Huaishu Hou^{2,*}, Shiwei Zhang¹, Mingxu Su^{1,**}, Zhifan Zhao²,
Chaofei Jiao²

¹University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093 China

²Shanghai Institute of Technology, Shanghai, 201418 China

E-mail: *hhs927@126.com; **sumx@usst.edu.cn

Ultrasonic testing of thick-walled polyethylene pipes is challenged by energy loss, resulting in weak echo signals from deep defects. To enhance the detection of these weak signals, a time-frequency energy concentration method is presented. The fractional adaptive superlet transform combines multiple wavelet transform results with distinct bandwidths through geometric averaging, providing superior time-frequency analysis capabilities than single wavelet transforms. However, its time-frequency representation exhibits the issue of instantaneous frequency deviation. The proposed method addresses the issue via instantaneous frequency-embedding, leading to improved accuracy in instantaneous frequency estimation. Numerical signal analysis reveals higher accuracy in instantaneous frequency estimation using this method, compared to other time-frequency processing methods. When applied to detecting deep defects in thick-walled polyethylene pipes, the method shows an 18.9% increase in weak signal enhancement capability compared to the continuous wavelet transform. Finally, the results demonstrate the method's accuracy in clarifying instantaneous frequency changes and enhancing instantaneous amplitudes of weak signals, offering a promising approach for the detection of deep defects in thick-walled polyethylene pipes.

Keywords: deep defect, weak signal, ultrasonic detection, fractional adaptive superlet transform, instantaneous frequency.

DOI: 10.31857/S0130308225020022

1. ВВЕДЕНИЕ

Полиэтилен широко используется в строительстве трубопроводных систем для транспортировки жидкостей, воды, природного газа и нефти. При контроле стыковых сварных швов с использованием ультразвуковых методов энергия звуковых волн значительно ослабевает, особенно сильно это сказывается на эхосигналах от глубоких дефектов в толстостенных трубах, которые являются очень слабыми. Такое затухание ограничивает возможности ультразвукового оборудования по обнаружению дефектов.

Для обнаружения слабых сигналов был предложен целый ряд методов, включая традиционные подходы, такие как усиление с блокировкой [1], интегрирование выборки и цифровое усреднение, адаптивная фильтрация [2, 3], а также более новые, такие как хаотические системы [4], стохастический резонанс [5], декомпозиция сигнала [6] и глубокое обучение [7]. Ученые внесли большой вклад в область обработки сигналов, добившись таких значительных успехов, как применение вейвлет-методов Лежандром и др. [8] для обнаружения эховолн Лэмба в фоновом шуме. Ши и др. [9] представили вейвлет-метод согласования электромагнитных ультразвуковых сигналов, оптимизирующий степень соответствия между вейвлет-базисом и эхосигналами в присутствии сильного фонового шума. Базулин [10] предположил, что разрешение слабых эхосигналов может быть дополнительно улучшено за счет использования гауссоподобного импульсного отклика при одновременном применении методов максимальной энтропии и компрессионного зондирования. Однако исследователи часто сосредотачивают свои усилия на извлечении слабых сигналов из временной области, упуская из виду свойства этих слабых сигналов в частотно-временной области. Это обусловило интерес авторов к исследованию поведения мгновенной частоты сигналов дефектов, особенно слабых эхосигналов от глубоких дефектов.

Среди методов анализа временных и частотных параметров, основанных на твердых математических принципах, непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) широко известно своей адаптивностью к изменяющимся характеристикам сигнала, предлагая множество разрешений и делая его предпочтительным инструментом во многих областях. Несмотря на свою универсальность, CWT сталкивается с некоторыми неотъемлемыми ограничениями, связанными с выбором вейвлетов и компромиссом между временным и частотным разрешением. Так, Мока и др. разработали суперлетное преобразование (SLT) [11], которое использует несколько вейвлетных базисных функций с одинаковой частотой, но разными полосами пропускания, создавая разнообразный набор семейств вейвлетных функций, предназначенных для захвата различных аспектов сигнала. Однако SLT демонстрирует избыточность на высоких частотах, что привело к предложению использовать адаптивное суперлетное преобразование (ASLT). После этого было предложено дробное адаптивное суперлетное преобразование (FASLT) для решения проблемы «полосатости», возникающей из-за дискретной природы порядка в ASLT [12]. Соответственно, FASLT было принято за основу для частотно-временного анализа слабых сигналов.

Цель данной работы — наблюдение за изменением мгновенной частоты (IF) и увеличение мгновенной амплитуды сигналов дефектов. Поиск идеальной IF изменяющегося во времени сигнала [13, 14] является ключевой задачей исследователей в области обработки сигналов. Добеши и др. предложили синхронизирующее вейвлет-преобразование (SSWT) [15] в качестве метода постобработки результатов распределения временных частот, который получил широкий интерес [16—21]. Основная идея состоит в том, чтобы уточнить распределение временных частот, сконцентрировав его вдоль частотного направления на основе IF. Основываясь на этой идее, мы интегрируем операцию синхронизации с FASLT, предлагая мультисинхронизацию FASLT с мгновенной частотой (IF-MSSFASLT). Этот метод применяется для анализа численного сигнала и обнаружения слабых сигналов от глубоких дефектов в материалах с высоким коэффициентом ослабления. Результаты показывают, что этот метод обладает исключительным разрешением по временной частоте, обеспечивая не только более точные оценки IF, но и повышая частотно-временную энергию слабых сигналов.

2. ТЕОРИЯ

2.1. Дробное адаптивное суперлетное преобразование (FASLT)

CWT имеет ограничения, связанные с его вейвлетными базисными функциями и балансом между временным и частотным разрешением. Для их преодоления Мока и др. предложили ASLT [11]. Она объединяет результаты нескольких вейвлет-преобразований, каждое из которых имеет разное разрешение по времени и частоте, используя среднее геометрическое, что позволяет получить сверхвысокое разрешение по времени и частоте.

Вейвлет-функция, используемая в ASLT, представляет собой модифицированную форму вейвлета Морле. Дочерняя вейвлет-функция имеет вид:

$$\psi(c_m; t, w) = \frac{5w}{c_m (2\pi)^{3/2}} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{5wt}{2\pi c_m} \right)^2} e^{jw t}, \quad (1)$$

где c_m — количество циклов вейвлета. Вейвлет-функции с различной шириной полосы пропускания реализуются путем изменения c_m .

Выражение ASLT:

$$\text{ASLT}_{x,c_1,o}(t,w) = \prod_{i=1}^o [R_x(c_1 \cdot i; t, w)]^{1/o}, \quad (2)$$

где o — порядок ASLT, указывающий на количество вейвлетов; c_1 — заданное значение для изменения c_m ; $R_x(c_i; t, w)$ обозначает свертку сигнала $x(t)$ и вейвлета с циклами c_i :

$$R_x(c_i; t, w) = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi(c_i; \tau - t, w) d\tau. \quad (3)$$

Порядок линейно увеличивается с частотой анализа, следуя расчету:

$$o(w) = o_{\min} + \text{round} \left[(o_{\max} - o_{\min}) \cdot \frac{w - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \right], \quad (4)$$

где w_{\max} и w_{\min} обозначают верхнюю и нижнюю границы частот при частотно-временном анализе; o_{\max} и o_{\min} — порядки преобразования на максимальной и минимальной частотах.

Дальнейшие исследования показали, что дискретный порядок в ASLT вызывает эффект «полосатости» при увеличении частоты анализа [12]. Для решения этой проблемы в FASLT используется порядок o_f , включающий целую часть o_i и дробную часть α в интервале $[0, 1)$, а именно $o_f = o_i + \alpha$. Выражение имеет вид:

$$\text{FASLT}_{x,c_1,o_f}(t,w) = \left[R_x(c_1 \cdot (o_i + 1); t, w)^\alpha \prod_{i=1}^{o_i} R_x(c_1 \cdot i; t, w) \right]^{1/o_f}. \quad (5)$$

При значении α , равном 0, FASLT упрощается до ASLT. В отличие от ASLT, FASLT использует истинный порядок, который можно вычислить по формуле:

$$o(w) = o_{\min} + (o_{\max} - o_{\min}) \cdot \frac{w - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}}. \quad (6)$$

Необходимо пояснить, что термин «дробный» в контексте FASLT отличается от его значения в дробном вейвлет-преобразовании и дробном преобразовании Фурье. В FASLT термин «дробный» означает включение результатов SWT как целого, так и нецелого порядка, в отличие от его использования в дробных вейвлет-преобразованиях и преобразованиях Фурье, где он обозначает промежуточное состояние в анализе временных и частотных характеристик. Таким образом, термин, хотя и является общим, имеет разные значения в каждом контексте.

2.2. Сравнение оценки мгновенной частоты между адаптивным преобразованием суперлета и дробным адаптивным преобразованием суперлета

Для наблюдения за изменениями IF сигнала первым шагом является получение значений IF. Однако непосредственно получить истинные значения IF реальных сигналов сложно, поэтому рекомендуется использовать не истинные, а оцененные IF. Добеши и др. оценили IF сигнала на основе SWT и предложенного SSWT [15]. Этот метод оценки признан многими учеными, поэтому он был представлен здесь для оценки IF в ASLT и FASLT.

Для любого t сигнала $x(t)$ в коротком интервале времени $\tau \in [t - \Delta t, t + \Delta t]$, предполагая, что изменения $A'(t)$ и $\varphi'''(t)$ достаточно малы, мы можем пренебречь членами высшего порядка $O(A'(t))$ и $O(\varphi'''(t))$. Согласно разложению Тейлора, сигнал $x(t)$ в точке t может быть выражен как

$$x(\tau) = A(t) e^{j2\pi[\varphi(t) + \varphi'(t)(\tau-t) + 0,5\varphi''(t)(\tau-t)^2]}. \quad (7)$$

Тогда, исходя из уравнения (1) и (3), следует:

$$R_x(c_1; t, w) = \frac{5w}{2\pi c_1 \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{5w}{2\pi c_1} \right)^2 - j\pi\varphi''(t)}} \cdot A(t) e^{j2\pi\varphi(t)} \cdot e^{\frac{\pi^2 \left(\frac{w}{2\pi} \varphi'(t) \right)^2}{\frac{1}{2} \left(\frac{5w}{2\pi c_1} \right)^2 - j\pi\varphi''(t)}}. \quad (8)$$

Когда $R_x(c_1; t, w) \neq 0$, IF сигнала может быть оценена через R_x , ASLT $_x$ и FASLT $_x$:

$$\begin{cases} \tilde{w}_R(c_1; t, w) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial_t R_x(c_1; t, w)}{j2\pi \cdot R_x(c_1; t, w)} \right\} = \varphi'(t) - Q_1 \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right) \\ \tilde{w}_{\text{ASLT}}(c_1; t, w) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial_t \text{ASLT}_x(c_1; t, w)}{j2\pi \cdot \text{ASLT}_x(c_1; t, w)} \right\} = \varphi'(t) - \frac{1}{o_i} \sum_{i=1}^{o_i} Q_2 \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right) \\ \tilde{w}_{\text{FASLT}}(c_1; t, w) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial_t \text{FASLT}_x(c_1; t, w)}{j2\pi \cdot \text{FASLT}_x(c_1; t, w)} \right\} = \varphi'(t) - \left[\frac{\alpha}{o_i + \alpha} \cdot Q_3 + \frac{1}{o_i + \alpha} \sum_{i=1}^{o_i} Q_2 \right] \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right) \end{cases} \quad (9)$$

где $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ — вещественная часть комплексного результата, а

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{\pi^2 \varphi''(t)^2}{\frac{1}{4} \left(\frac{5w}{2\pi c_1} \right)^2 + \pi^2 \varphi''(t)^2} \\ Q_2 = \frac{\pi^2 \varphi''(t)^2}{\frac{1}{4} \left[\frac{5w}{2\pi(c_i \cdot i)} \right]^4 + \pi^2 \varphi''(t)^2} \\ Q_3 = \frac{\pi^2 \varphi''(t)^2}{\frac{1}{4} \left[\frac{5w}{2\pi c_i \cdot (o_i + 1)} \right]^4 + \pi^2 \varphi''(t)^2} \end{cases} \quad (10)$$

Сравнивая $\tilde{\omega}_{\text{ASLT}}(c_1; t, w)$ и $\tilde{\omega}_{\text{FASLT}}(c_1; t, w)$, можно сказать, что они имеют схожие формы, однако расчетный IF FASLT включает дополнительный член, обусловленный дробным порядком вейвлет-преобразования. Если $\alpha = 0$, то они равны. Таким образом, этот дополнительный член показывает, что введение преобразований дробного порядка и геометрического среднего может повлиять на расчетный IF. Последующий численный анализ сигнала подтвердил, что дополнительный член вызывает отклонение IF в плоскости время—частота.

2.3. Предлагаемое мгновенное частотно-вложенное мультисинхронизирующее дробное адаптивное суперлетное преобразование

После получения двух выражений оценки IF, временная и частотная энергия FASLT может быть сконцентрирована с помощью операции синхронного сжатия. Синхронное сжатие FASLT (SSFASLT) — это

$$\text{SSFASLT}(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{FASLT}(t, w) \delta(\eta - \tilde{w}_{\text{FASLT}}(c_1; t, w)) dw, \quad (11)$$

где $\delta(\cdot)$ — функция распределения Дирака.

Хотя SSFASLT улучшает концентрацию энергии во временно-частотном распределении, он не концентрирует энергию на более точных IF. Чтобы решить проблему отклонения IF, мы исключили результаты дробного порядка и использовали только оценки IF вейвлет-преобразования целого порядка, полученные из ASLT, создав таким образом SSFASLT с вложением мгновенной частоты (IF-SSFASLT). Его выражение:

$$\text{IF-SSFASLT}(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{FASLT}(t, w) \delta(\eta - \tilde{w}_{\text{ASLT}}(c_1; t, w)) dw. \quad (12)$$

Операция мультисинхронного сжатия может непрерывно концентрировать энергию временной частоты ближе к гребню мгновенной частоты, чем операция синхронного сжатия [21]. Таким образом, мы ввели операцию мультисинхронного сжатия для итеративного уточнения результатов, полученных с помощью SSFASLT и IF-SSFASLT, и назвали их мультисинхронное сжатие FASLT (MSSFASLT) и IF-MSSFASLT. Различие между этими двумя методами обусловлено использованием различных значений оценки IF. Оценка IF в MSSFASLT рассчитывается с помощью FASLT, а оценка IF в IF-MSSFASLT рассчитывается с помощью ASLT. Выражение IF-MSSFASLT после N -й итерации имеет вид:

$$\text{IF-MSSFASLT}^N(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{FASLT}(t, w) \delta(\eta - \tilde{w}_{\text{ASLT}}^N(c_1; t, w)) dw, \quad (13)$$

где расчетная IF, используемая сейчас, равна:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_{\text{ASLT}}^N(c_1; t, w) = \varphi'(t) + & \left(-\frac{1}{o_i} \sum_{i=1}^{o_i} \frac{\pi^2 \varphi''(t)^2}{\frac{1}{4} \left(\frac{5}{c_i \cdot i} \cdot \left(\varphi'(t) - \frac{1}{o_i} \sum_{i=1}^{o_i} \mathcal{Q}_2 \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right) \right) \right)^4 + \pi^2 \varphi''(t)^2} \right)^{N-1} \times \\ & \times \left(-\frac{1}{o_i} \sum_{i=1}^{o_i} \mathcal{Q}_2 \right) \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Дальнейший вывод показывает, что ошибка между оцененной N -й IF $\tilde{w}_{\text{ASLT}}^N(c_1; t, w)$ и истинной IF $\varphi'(t)$ составляет

$$\left| \tilde{w}_{\text{ASLT}}^N(c_1; t, w) - \varphi'(t) \right| < \left| \frac{1}{o_i} \sum_{i=1}^{o_i} \mathcal{Q}_2 \cdot \left(\frac{w}{2\pi} - \varphi'(t) \right) \right| = \left| \tilde{w}_{\text{ASLT}}(c_1; t, w) - \varphi'(t) \right|. \quad (15)$$

Уравнение (15) означает, что $\tilde{w}_{\text{ASLT}}^N(c_1; t, w)$ гораздо ближе к истинному IF, чем $\tilde{w}_{\text{ASLT}}(c_1; t, w)$. Другими словами, в результате последовательных итераций и построения пересмотренных оценок IF, IF-MSSFASLT постепенно сходится к истинному IF, тем самым давая все более концентрированные представления временных частот.

3. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ

$$\begin{cases} \varphi'(t) = 90 \sin\left(\frac{9}{20}t + \frac{\pi}{4}\right) + 30 \sin\left(2t - \frac{4\pi}{5}\right) + 10 \sin\left(\frac{5}{2}t - \frac{4\pi}{3}\right) + 70 \\ s_1(t) = 2 \cos(\varphi(t)) \\ s_2(t) = s_1(t) + n(t) \end{cases} \quad (16)$$

Для оценки возможностей частотно-временного анализа IF-MSSFASLT сигналов дефектов при ультразвуковом контроле числовой сигнал центрируется на частоте 150 Гц и колеблется в диапазоне ± 50 Гц вокруг этой основной частоты. Что касается дисперсионных свойств полиэтилена, то численный сигнал демонстрирует постепенное снижение частоты с течением времени. Изменяющийся во времени сигнал $s(t)$ определяется согласно уравнению (16), где $n(t)$ обозначает белый шум с отношением сигнал/шум (SNR) 12 дБ.

Результаты частотно-временного анализа смоделированного сигнала с использованием традиционных методов обработки сигналов, таких как CWT и SSWT, представлены на рис. 1. Как для CWT, так и для SSWT, в качестве базисных функций вейвлетов используются вейвлеты Морле. Наблюдения показывают, что вейвлет-преобразование обеспечивает высокое частотное разрешение на низких частотах, однако это разрешение ослабевает на более высоких частотах.

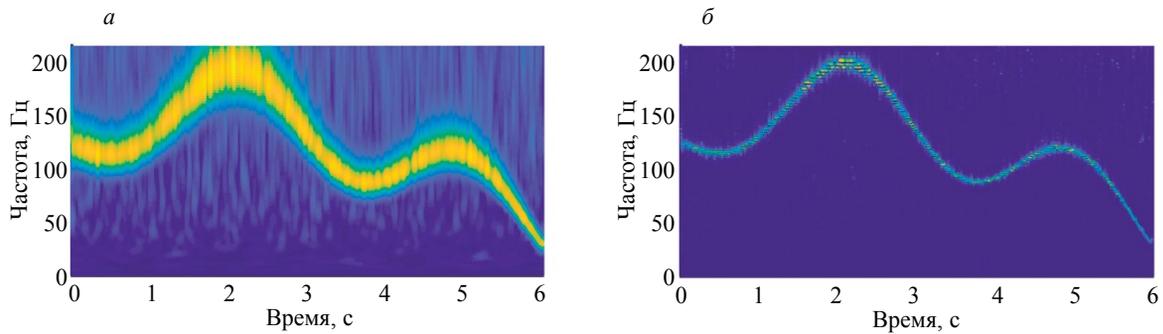


Рис. 1. Временно-частотные представления моделируемого сигнала: CWT (а); SSWT (б).

Хотя SSWT повышает точность временно-частотного распределения, оно еще не полностью преодолело ограничения, присущие CWT.

Результаты частотно-временного анализа, полученные с помощью ASLT и FASLT на смоделированных сигналах, представлены на рис. 2. Применяемый порядок варьируется от 1 до 5.

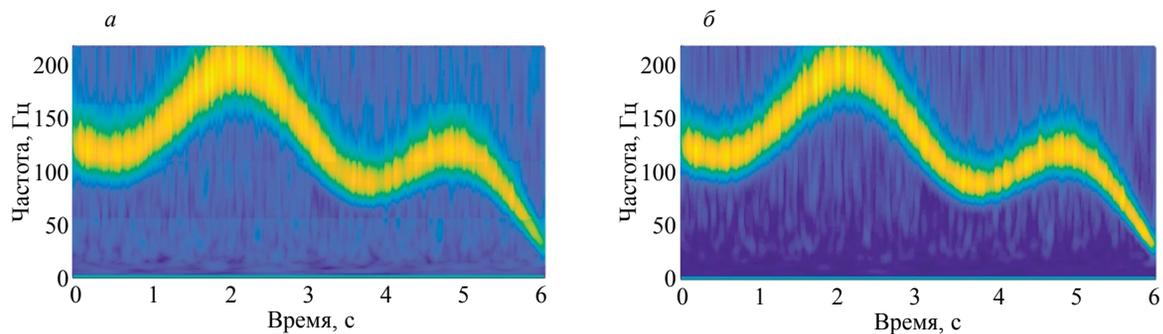


Рис. 2. Временно-частотные представления моделируемого сигнала: ASLT (а); FASLT (б).

Как видно на рис. 2, ASLT демонстрирует явление «полосатости», в то время как FASLT заметно лучше справляется с этой проблемой. Поэтому для снижения вычислительной нагрузки при последующем анализе временных и частотных характеристик сигнала был выбран FASLT.

Результаты частотно-временного анализа, полученные с помощью предложенных SSFASLT, MSSFASLT, IF-SSFASLT и IF-MSSFASLT, показаны на рис. 3, порядок варьируется от 5 до 9.

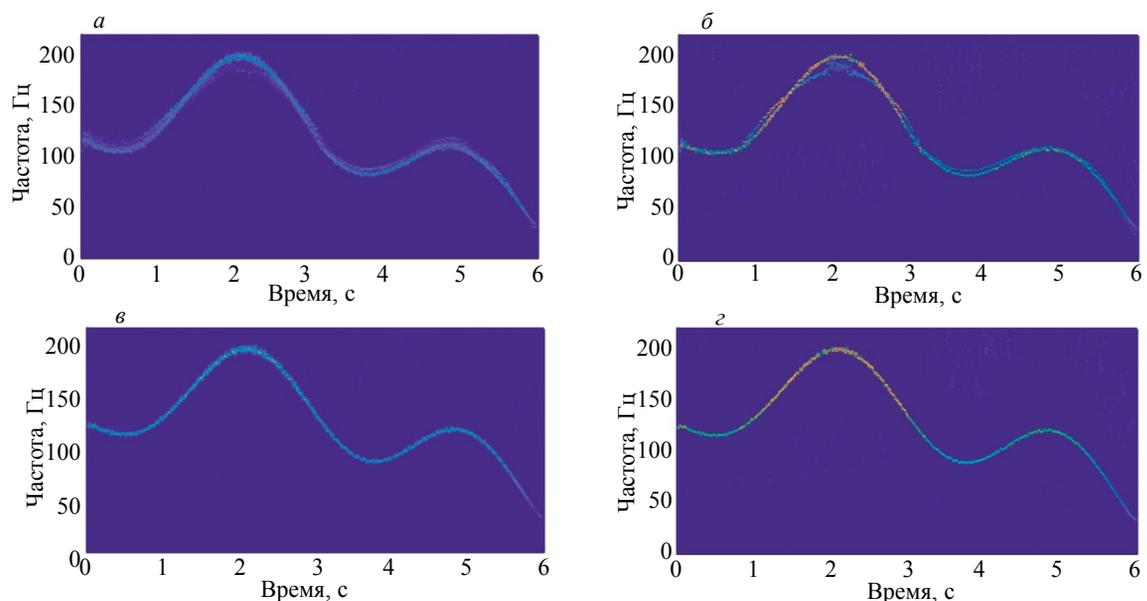


Рис. 3. Временно-частотные представления моделируемого сигнала: SSFASLT (а); MSSFASLT ($N=5$) (б); IF-SSFASLT (в); IF-MSSFASLT ($N=5$) (г).

На рис. 3а показано, что, хотя SSFASLT улучшает концентрацию временных частот по сравнению с FASLT, он вызывает определенное отклонение в гребне IF. На рис. 3б видно, что после нескольких итераций MSSFASLT имеет два отчетливых гребня IF. Дальнейший анализ показывает, что эти гребни пересекаются в точках, где целочисленный порядок испытывает скачок, что говорит о том, что результаты вейвлет-преобразования дробного порядка оказывают влияние на распределение IF. На рис. 3в и 3г, за исключением результатов дробного порядка, оба метода дают четкое представление о гребнях IF.

Сравнительный анализ точности временно-частотных гребней проведен между классическим SSWT, предложенным SSFASLT, IF-SSFASLT и IF-MSSFASLT. Их гребни IF, а также ошибки между оцененной IF и идеальной IF представлены на рис. 4.

Видно, что ошибка оценки IF в начальной и конечной позициях сигнала относительно велика, поэтому для сравнения четырех результатов ошибок используются 2-й и 98-й перцентили. 2-й и 98-й перцентили ошибок оценки IF для SSWT составляют $-4,7$ и $1,9$ соответственно (см. рис. 4а), что говорит о высокой точности оценки IF для SSWT. В отличие от этого, перцентили SSFASLT составляют $-0,9$ и $12,6$ соответственно (см. рис. 4б). Значительная погрешность SSFASLT объясняется двумя основными факторами: операцией геометрического среднего при вычислении FASLT и введением результатов вейвлет-преобразования дробного порядка, которое направлено на смягчение явления «полосатости». Однако после встраивания информации о IF ошибка IF-SSFASLT значительно снижается, перцентили составляют $-1,5$ и $1,8$ соответственно (см. рис. 4в). А 2-й и 98-й перцентили ошибок оценки ПЧ в IF-MSSFASLT составляют $-1,5$ и $1,9$ соответственно (см. рис. 4г). Это улучшение говорит о том, что оценка IF с помощью ASLT может обеспечить более точную оценку IF, чем FASLT и SSWT.

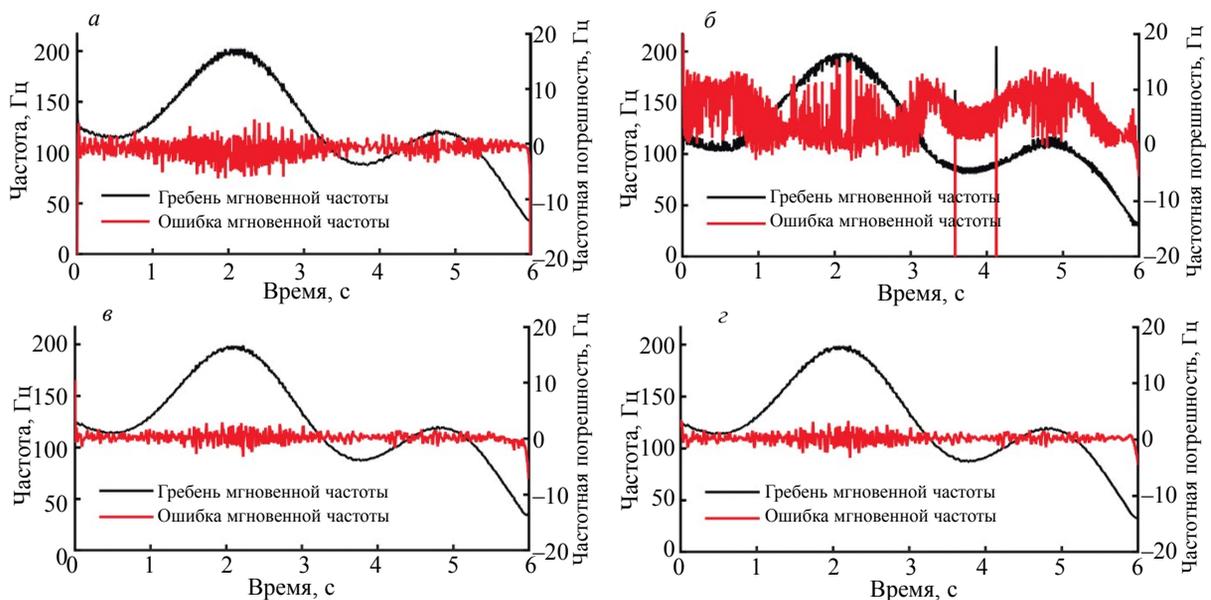


Рис. 4. Гребни IF и ошибки моделируемого сигнала: SSWT (а); SSFASLT (б); IF-SSFASLT (в); IF-MSSFASLT ($N = 5$) (г).

Энтропия Рённи служит широко используемым показателем для количественной оценки степени кластеризации распределений временных частот [22]. Более низкое значение энтропии означает большую концентрацию энергии сигнала, что, в свою очередь, отражает более высокую степень кластеризации во временно-частотной области. Значения энтропии Рённи, полученные в результате применения различных методов обработки временных частот, упомянутых ранее, к моделируемому сигналу, приведены в табл. 1.

Табл. 1 показывает, что, хотя ASLT использует несколько вейвлет-преобразований с различной шириной полосы пропускания для повышения разрешения по временной частоте, этот подход приводит к снижению степени концентрации энергии во временной частоте. Однако операция синхронного сжатия может улучшить концентрацию энергии во временной области. Более того, операция мультисинхронного сжатия способствует дальнейшему увеличению энергии вдоль временного частотного хребта. Это улучшение помогает более четко анализировать изменения IF в изменяющихся во времени сигналах. Таким образом, представленный в данной работе IF-MSSFASLT демонстрирует исключительные возможности в разрешении IF.

Сравнение энтропии Рённи для нескольких методов

Методы	CWT	ASLT	FASLT	SSWT	SSFASLT	IF-SSFASLT	IF-MSSFASLT ($N = 5$)
Энтропия Рённи	17,2	18,5	18,4	13,4	14,8	13,7	11,9

4. АНАЛИЗ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ

Для подтверждения эффективности алгоритма IF-MSSFASLT в обнаружении слабых сигналов был изготовлен образец трубы из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), широко используемый в атомной энергетике. Образец имеет толщину стенки 120 мм и семь продольно расположенных боковых отверстий, каждое из которых имеет диаметр 3 мм. Первое отверстие расположено на расстоянии 20 мм от внешней стенки, а остальные отверстия находятся на расстоянии 10 мм друг от друга, как показано на рис. 5а. Система сбора сигнала состоит из наклонного ультразвукового преобразователя, ультразвукового импульсного приемника (Olympus 5072PR), платы АЦП (NI PCI-5114), промышленного компьютера и программного обеспечения для обнаружения. Преобразователь имеет угол преломления 45° , размер пьезоэлектрического кристалла 10×10 мм² и среднюю частоту 1,5 МГц. Система работает на частоте дискретизации сигнала 50 МГц, используя глицерин в качестве связующего вещества. Учитывая значительное затухание акустической энергии в ПЭВП, трудно визуализировать все эхосигналы от дефектов одновременно. На рис. 5б показаны все 25 сигналов, при этом ультразвуковой датчик постепенно удаляется от дефекта вручную. Для усиления мгновенной амплитуды сигналов дефектов за счет концентрации энергии во временной частоте был выбран 20-й сигнал дефекта. Затем он был обработан с помощью CWT, FASLT и IF-MSSFASLT с порядком от 10 до 20.

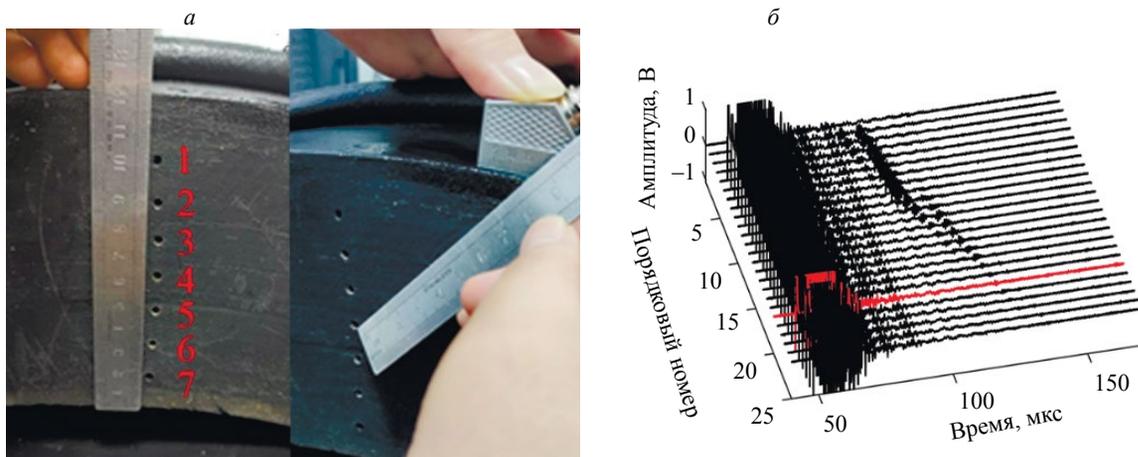


Рис. 5. Образец трубы из ПЭВП (а); собранные сигналы (б).

На рис. 6а эхо четвертого дефекта очень слабое, практически незаметное. Сравнение между CWT и FASLT показывает, что оба метода могут точно идентифицировать эхосигналы дефектов для определения местоположения, при этом их энергия временной частоты рассеивается. После концентрации энергии временной частоты на рис. 6б можно наблюдать более точные и подробные изменения мгновенной частоты эхосигналов дефектов. На нем видно, что IF эха дефектов колеблется, причем сначала повышается, а затем дважды понижается в пределах одного эха.

Чтобы лучше оценить эти слабые эхосигналы, были сравнены кривые пиков, полученные с помощью трех различных методов обработки. В связи с тем, что частотно-временные коэффициенты IF-MSSFASLT значительно больше, чем у FASLT и CWT, амплитуды были нормализованы для сравнительных целей. Кривые локальных пиков трех методов представлены на рис. 7 и в табл. 2. Кроме того, поскольку согласованная фильтрация (MF) является мощным методом обнаружения слабых сигналов, шаблон был построен из обращенной во

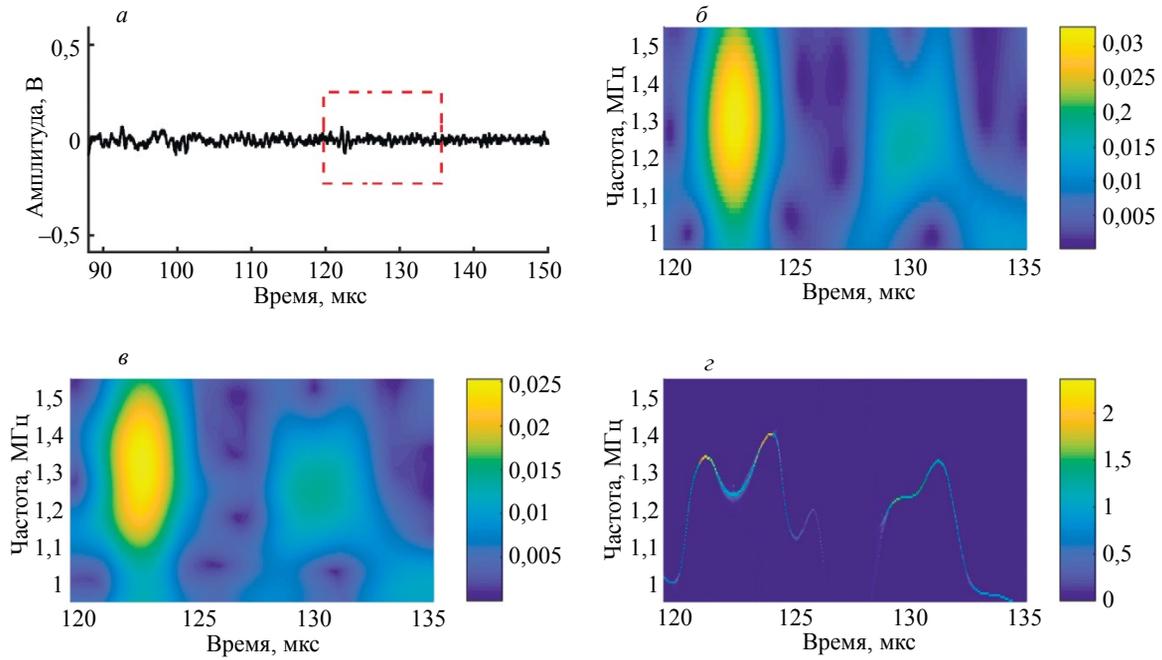


Рис. 6. Временно-частотные представления сигнала, содержащего дефекты 3 и 4: исходный сигнал (а); CWT (б); FASLT (в); IF-MSSFASLT ($N=5$) (г).

времени и преобразованной в сопряженную версию эхосигнала дефекта, и нормализованные результаты также включены.

Рис. 7 и табл. 2 показывают следующее: (1) метод с минимальной относительной разницей амплитуд — IF-MSSFASLT, который увеличивает амплитуду эхосигналов от дефектов на 18,9 % по сравнению с CWT и превосходит MF на 13,6 %. Кроме того, он имеет наибольшее полное изменение величины; (2) хотя MF обычно может точно идентифицировать полезные сигналы на фоне высокого уровня шума, он демонстрирует вторую по величине разницу амплитуд между двумя дефектами. Возможно, лучших результатов можно добиться за счет более глубокой проработки параметров; (3) FASLT увеличивает разницу амплитуд между двумя дефектами на 4,4 % по сравнению с CWT, что говорит о том, что результаты по временной частоте, полученные с помощью нескольких вейвлет-преобразований с разными полосами пропускания, превосходят результаты, полученные с помощью одного вейвлет-преобразования. Это указывает на то, что после нескольких итераций перераспределения и концентрации энергии IF-MSSFASLT не только обеспечивает более четкие изменения IF, но и более эффективно улучшает видимость слабых сигналов.

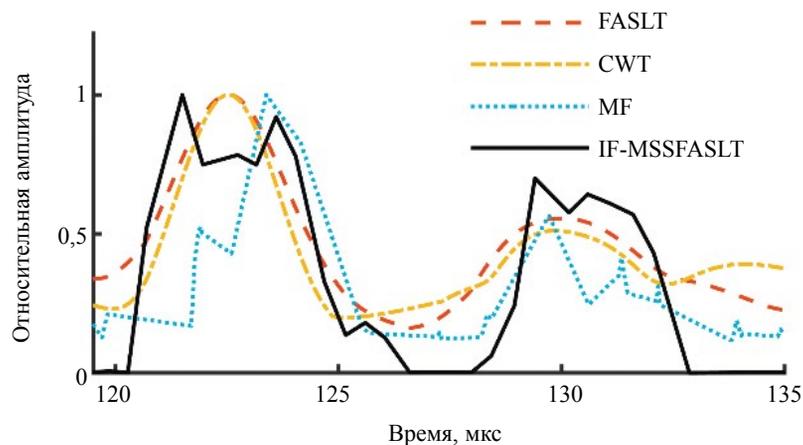


Рис. 7. Сравнение пиковых кривых с MF сигнала, содержащие дефекты 3 и 4.

Сравнение относительной амплитуды нескольких методов

Относительная амплитуда	Методы			
	CWT	FASLT	MF	IF-MSSFASLT ($N = 5$)
Третий дефект, %	100	100	100	100
Четвертый дефект, %	51,2	55,6	56,5	70,1

Кроме того, было отмечено небольшое отклонение положения пиков дефектов в четырех методах. Это связано с тем, что, несмотря на многочисленные операции аппроксимации, не вся энергия может быть полностью сконцентрирована в оцениваемой IF. К счастью, разница составляет всего 2 мкс, что вполне достаточно для определения положения дефекта при практическом обнаружении.

Тщательное изучение временно-частотного анализа сигналов показало, что траектория IF эхосигналов дефектов не является фиксированной, она немонотонно растет или падает, а имеет подъемы и спады, и даже сначала растет, а затем падает два раза в пределах одного эхосигнала. Тем не менее частота всегда возвращается в окрестности средней частоты датчика. Кроме того, по мере увеличения расстояния от дефекта до датчика происходит постепенное снижение частоты эхосигнала от дефекта, что объясняется эффектом дисперсии полиэтиленового материала.

Учитывая параметры образца, четвертый дефект был определен на глубине 60 мм. В данной работе использовался наклонный ультразвуковой преобразователь с углом преломления 45° . С учетом расстояния до передней кромки фактическое расстояние от преобразователя до четвертого дефекта превышает 85 мм. Следовательно, можно сделать вывод, что при использовании подходящего ультразвукового преобразователя предложенный метод IF-MSSFASLT позволяет обнаруживать дефекты отверстий диаметром 3 мм в толстостенных полиэтиленовых трубах на максимальной глубине 85 мм.

5. ВЫВОДЫ

Для наблюдения за изменениями мгновенной частоты и улучшениями мгновенной амплитуды сигналов дефектов в этой статье FASLT перестраивается через концентрацию энергии времени—частоты, а именно метод IF-MSSFASLT. FASLT, который объединяет несколько результатов CWT с использованием геометрического среднего, и, таким образом, теоретически, этот метод можно считать инструментом постобработки для CWT. Основные выводы включают:

1. Мгновенная частота эхосигнала дефекта не является постоянной, она не увеличивается и не уменьшается монотонно. Вместо этого она демонстрирует колебательные изменения, и даже в пределах одного и того же эхосигнала могут наблюдаться два раза — повышение и понижение.

2. Теоретические выкладки показывают, что операция геометрического усреднения и введение результата вейвлет-преобразования дробного порядка приведут к отклонению IF в FASLT, что приведет к неправильным траекториям IF после концентрации энергии во времени и частоте. Поскольку оценка IF, полученная с помощью ASLT, ближе к истинной IF, чем оценка IF, полученная с помощью FASLT, отклонение IF в FASLT может быть исправлено путем встраивания оценок IF ASLT.

3. Численный анализ сигнала показывает, что IF-MSSFASLT может эффективно перераспределять энергию сигнала во времени и частоте, получая более точные изменения IF и более концентрированное представление во времени и частоте.

4. Экспериментальный анализ сигналов показывает, что IF-MSSFASLT может эффективно усиливать временно-частотную энергию слабых сигналов, причем эффект усиления превышает эффект CWT на 18,9 %.

IF-MSSFASLT объединяет превосходное представление временной частоты FASLT с идеей концентрации энергии во временной частоте, что приводит к более точным оценкам IF, тем самым улучшая видимость слабых сигналов дефектов во временной частотной плоскости. Исключительная точность улавливания изменений IF позволяет предположить, что более короткий интервал регистрации сигнала может дать новое представление о мгновенных частотно-временных характеристиках различных эхосигналов от дефектов. Кроме того, потенциальные области применения IF-MSSFASLT выходят за рамки ультразвуковой обработки сигналов, охватывая

такие области, как диагностика неисправностей подшипников, обработка физиологических сигналов и анализ радиолокационных сигналов.

Работа выполнена в рамках гранта Национального фонда естественных наук Китая № 52376162. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xie K., Chen L.H., Huang A.F., Zhao K., Zhang H.L. An auxiliary frequency tracking system for general purpose lock-in amplifiers // *Meas. Sci. Technol.* 2018. V. 29. P. 045010.
2. Zhang Y.G., Jin D.Q., Chen J. A model-based variable step-size strategy for proximal multitask diffusion LMS algorithm // *Digit. Signal Process.* 2021. V. 117. P. 103199.
3. Wan C.T., Chen D.Y., Yang J. Pulse rate estimation from forehead photoplethysmograph signal using RLS adaptive filtering with dynamical reference signal // *Biomed. Signal Proces.* 2022. V. 71. P. 103189.
4. Dong K.F., Xu K., Zhou Y.Y., Zuo C., Wang L.M., Zhang C.K., Jin F., Song J.L., Mo W.Q., Hui Y.J. A memristor-based chaotic oscillator for weak signal detection and its circuitry realization // *Nonlinear Dynam.* 2022. V. 109. No. 3. P. 2129—2141.
5. Shi P.M., Li M.D., Zhang W.Y., Han D.Y. Weak signal enhancement for machinery fault diagnosis based on a novel adaptive multi-parameter unsaturated stochastic resonance // *Appl. Acoust.* 2022. V. 189. P. 108609.
6. Ni Q., Ji J.C., Feng K., Halkon B. A fault information-guided variational mode decomposition (FIVMD) method for rolling element bearings diagnosis // *Mech. Syst. Signal. Pr.* 2022. V. 164. P. 108216.
7. Jiang Y., Li H.B., Rangaswamy M. Deep learning denoising based line spectral estimation // *IEEE Signal Proc. Let.* 2019. V. 26. No. 11. P. 1573—1577.
8. Legendre S., Massicotte D., Goyette J., Bose T.K. Wavelet-transform-based method of analysis for Lamb-wave ultrasonic NDE signals // *IEEE T. Instrum. Meas.* 2000. V. 49. No. 3. P. 524—530.
9. Shi G.M., Chen X.Y., Song X.X., Qi F., Ding A.L. Signal matching wavelet for ultrasonic flaw detection in high background noise // *IEEE T. Ultrason. Ferr.* 2011. V. 58. No. 4. P. 776—787.
10. Bazulin E.G. Detection of echo signals from discontinuities due to the use of superresolution procedures for testing concrete piles by the impact method // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2023. V. 59. P. 868—875.
11. Moca V.V., Bârzan H., Nagy-Dăbâcan A., Muresan R.C. Time-frequency super-resolution with superlets // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. P. 337.
12. Bârzan H., Moca V.V., Ichim A.M., Muresan R.C. Fractional superlets // *Proc. Eur. Signal Process. Conf.* 2021. P. 2220—2224.
13. Nemytova O.V., Rinkevich A.B., Perov D.V. Instantaneous frequency estimation used for the classification of echo signals from different reflectors // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2012. V. 48. P. 649—661.
14. Wang J., Han Y., Wang L.M., Zhang P.Z., Chen P. Instantaneous frequency estimation for motion echo signal of projectile in bore based on polynomial chirplet transform // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2018. V. 54. P. 44—54.
15. Daubechies I., Lu J.F., Wu H.T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool // *Appl. Comput. Harmon. A.* 2011. V. 30. No. 2. P. 243—261.
16. Thakur G., Wu H.T. Synchrosqueezing-based recovery of instantaneous frequency from nonuniform samples // *SIAM J. Math. Ana.* 2011. V. 43. No. 5. P. 2078—2095.
17. Starkhammar J., Reinhold I., Moore P.W., Houser D.S., Sandsten M. Detailed analysis of two detected overlaying transient components within the echolocation beam of a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 145. No. 4. P. 2138—2148.
18. Yu G., Wang Z.H., Zhao P. Multisynchrosqueezing transform // *IEEE T. Ind. Electron.* 2019. V. 66. No. 7. P. 5441—5455.
19. Yu G., Yu M.J., Xu C.Y. Synchroextracting transform // *IEEE T. Ind. Electron.* 2017. V. 64. No. 10. P. 8042—8054.
20. Ando S. Time-frequency representation with variant array of frequency-domain Prony estimators // *J. Acoust. Soc. Am.* 2021. V. 150. No. 4. P. 2682—2694.
21. Wang Q., Li Y.X., Chen S.J., Tang B. Matching demodulation synchrosqueezing S transform and its application in seismic time-frequency analysis // *IEEE Geosci. Remote S.* 2022. V. 19. P. 1—5.
22. Baraniuk R.G., Flandrin P., Janssen A.J.E.M., Michel O.J.J. Measuring time-frequency information content using the Renyi entropies // *IEEE T. Inform. Theory.* 2001. V. 47. No. 4. P. 1391—1409.