

УДК 519.673

## Совмещение вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных шумовых сигналов\*

А.А. ХАМУХИН

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, к. т. н., доцент, e-mail: aaxtru@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов раннего обнаружения объектов по их шумам. Цель работы: снижение «мёртвого времени» в задаче обнаружения объектов по их шумам, т. е. времени реализации стадий традиционно последовательного вычисления: непрерывного вейвлет-преобразования, интегрального вейвлет-спектра, определения максимумов в пороговом устройстве (за счёт модификации алгоритмов вычислений и частичного совмещения стадий вычисления). **Методы исследования:** аналитический вывод математических формул для алгоритмов совмещённого вычисления дискретизированного вейвлет-преобразования и интегрального вейвлет-спектра. Компьютерное моделирование задачи обнаружения с различными тестовыми шумами. **Результаты:** показано, что совмещение вычисления последовательно уточняет вейвлет-спектр, что позволяет принять решение о наличии признака обнаружения узкополосного шумового сигнала до окончания полного цикла непрерывного вейвлет-преобразования, что сокращает общее время расчёта. Приведён пример математического моделирования обнаружения двух тестовых сигналов в дискретном белом шуме с отрицательным отношением сигнал/помеха от  $-3$  до  $-6$  дБ, показывающий, что совмещение вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования позволяет обнаружить оба сигнала в шуме уже на 160 шаге по времени из 256 шагов полного цикла.

**Ключевые слова:** непрерывное вейвлет-преобразование, интегральный вейвлет-спектр, узкополосный шум, обнаружение, совмещение вычислений, вейвлет, отношение сигнал/помеха, математическое моделирование

### ВВЕДЕНИЕ

Преимущества вейвлет-преобразования (ВП) нестационарных сигналов по сравнению с классическим преобразованием Фурье были чётко сформулированы относительно недавно [1] в одном из журналов Международной некоммерческой организации инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). Если в том же 1990 году под эгидой IEEE вышло всего 77 публикаций со словом «wavelet» в названии статьи, то в 2013 г. – 2128 [2]. В настоящее время IEEE издаёт более 100 тематических профессиональных журналов, под эгидой IEEE проводятся (и индексируются в мировых научных базах) более 1300 тематических конференций. Цифровая библиотека IEEE содержит более 3,6 млн. публикаций [2]. Всего в этой базе хранится 18061 статья, содержащая в названии слово «wavelet» (на 09.03.2014).

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) занимает в этом объёме около 10 %. Это связано с тем, что его вычисление более сложно по сравнению с дискретным ВП. Но НВП позволяет извлечь больше информации из анализируемых данных, поэтому оно нашло широкое применение в анализе нестационарных сигналов с целью выявления в них каких-либо особенностей.

---

\* Статья получена 03 февраля 2014 г.  
Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

Например, в работе [3] описан метод обнаружения провалов напряжения в электросети, основанный на непрерывном ВП в сочетании с энтропийным методом расчёта энергетических потерь. Показано его преимущество по сравнению с быстрым преобразованием Фурье. В [4] представлено сочетание вейвлет-анализа и преобразования Гильберта для анализа колебания давления кипящего слоя. Работа основана на обработке экспериментальных данных и сопоставления их с расчётными результатами. Показана зависимость колебания давления от размера частиц в кипящем слое. В работе [5] вейвлет-преобразование применяется в сочетании с корреляционным анализом. Благодаря этому авторам удалось создать методику обнаружения утечек в газопроводах по инфразвуковой волне. Не меньший интерес в этой статье представляют волоконно-оптические датчики инфразвуковой волны, созданные в Китайской академии наук. Без таких датчиков методика была бы нереализуемой. В статье [6] описано решение задачи обнаружения посторонних предметов на взлётно-посадочной полосе аэродрома. Видеоизображение обрабатывается в онлайн-режиме с помощью вейвлет-преобразования в сочетании с методами распознавания образов. Это позволяет вычислять координаты посторонних предметов и оперативно информировать диспетчерскую службу, что повышает безопасность пассажиров самолётов. Работа выполнена методом моделирования в пакете Matlab.

В исследовании [7] представлено применение НВП для идентификации деформаций и повреждений консольных балок. Исследовано появление различных конфигураций трещин с помощью моделирования в системе ANSYS. Показано, что использование анализа энергии деформации даёт больший уровень идентификации, чем анализ колебаний смещения. В работе [8] подробно описан запатентованный способ диагностики состояния буровых долот по вейвлет-анализу колебаний давления промывочной жидкости в сочетании с колебаниями осевой нагрузки на долото. Запатентованный способ диагностики предломпажного состояния авиационных двигателей, основанный на сочетании корреляционного и дисперсионного анализа вейвлет-преобразования сигналов, снимаемых с установленных на двигателе датчиков, изложен в работе [9]. Целый ряд работ посвящён выявлению неисправностей различных электрических машин (асинхронных двигателей, синхронных генераторов и т. д.) с помощью непрерывного вейвлет-преобразования в сочетании с другими различными методами анализа данных [10–15].

Таким образом, можно сделать вывод, что совместное применение методов вейвлет-преобразования в сочетании с другими разнообразными методами даёт новые научные результаты, отражаемые в потоке научных публикаций, упомянутом в начале статьи.

Следует отметить, что некоторые новые задачи требуют ускорения вычисления НВП, поскольку этот процесс является вычислительно ёмким. Кроме этого, в разных приложениях имеются свои специфические условия, которые позволяют улучшать временные характеристики алгоритмов. Например, в статье [16] для ускорения вычисления НВП предложено применение фильтров с конечной импульсной характеристикой и метода наименьших квадратов, ограничивающего число ненулевых коэффициентов фильтра. В работе [17] описано устройство для параллельного вычисления НВП с помощью ячеистых вычислительных структур, реализуемых на программируемых логических интегральных схемах. Распараллеливание алгоритмов существенно ускоряет процесс вычислений и выполняется с помощью анализа программируемых логических схем на основе структурно-графического представления [18].

## 1. ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача обнаружения (активного и пассивного) узкополосных шумовых сигналов в широкополосном шуме также решается с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. Здесь не рассматривается активное обнаружение, основанное на передаче и приёме отражённых от объекта сигналов. Пассивное обнаружение основано на выявлении собственных шумов обнаруживаемого объекта и широко применяется в гидролокации для обнаружения надводных судов и подводных лодок. Пассивное обнаружение применяется для исключения обнаружения противником посылаемого сигнала, т. е. маскировки самого факта слежения.

Среди всех источников шума движущего судна есть такие, которые образуют так называемые звукоряды [19]. Звукоряд – это характерная особенность шумов гребных винтов подводных кораблей. Этот вид шума состоит из отдельных узкополосных (тональных) шумов, имеющих линейчатый спектр с кратными частотами. Один из методов эффективного обнаружения подводных объектов и основан на выявлении таких звукорядов в общем широкополосном шуме [20].

Значения частот и амплитуд звукоряда зависят от скорости вращения гребного вала и скорости движения объекта, поэтому заранее неизвестны. Непрерывное вейвлет-преобразование шумового сигнала и вычисление интегрального вейвлет-спектра (ИВС) теоретически позволяет по наличию максимумов идентифицировать наличие звукоряда в анализируемом шуме [20]. Чтобы не было ложных сигналов обнаружения, интегральный вейвлет-спектр должен иметь не менее двух-трёх максимумов с кратным соотношением частот. Входной шумовой сигнал последовательно проходит три стадии после аналогово-цифрового преобразования: непрерывное вейвлет-преобразование, вычисление интегрального вейвлет-спектра и поиск несколькихкратно расположенных максимумов ИВС с помощью специального порогового устройства (ПУ). Каждая следующая стадия может начаться только тогда, когда закончится предыдущая. Результат получается с некоторой задержкой, которую называют «мёртвым временем». Эта задержка тем больше, чем больше размер оцифрованного пакета входных данных ( $N$ ), направляемый на один цикл обработки. При поступлении каждого нового отчёта входного сигнала (одного или нескольких) требуется сдвинуть пакет данных на единицу (или несколько единиц) и повторить весь цикл обработки, в течение которого опять наступает период «мёртвого времени». Снижение «мёртвого времени» любым способом является актуальной проблемой для экипажа, ведущего обнаружение кораблей противника, потому что, если противник обнаружит нас раньше, то может первым нанести удар (в случае военных действий). Поэтому целью исследований является снижение времени реализации стадий вычислений НВП–ИВС–ПУ за счёт модификации алгоритмов вычислений путём частичного совмещения стадий вычисления.

## 2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [21–23] подробно изложено решение поставленной цели за счёт распараллеливания алгоритма вычисления и реализации его на множестве одинаковых вычислительных ячеек, каждая из которых связана с соседними ячейками и центральным процессором. Все ячейки работают синхронно и параллельно. Благодаря их внутренней структуре решение общей задачи получается за минимальное время. Однако реализация подобных устройств требует дополнительных затрат на опытно-конструкторскую разработку аппаратуры. Поэтому нам необходимо модифицировать этот алгоритм так, чтобы применять его в обычных последовательных микропроцессорах.

В [24] предложен итерационный алгоритм вычисления дискретизированного НВП вида

$$W(a_j, b_k) = \frac{1}{\sqrt{a_j}} \sum_{i=0}^N S(t_i) \cdot \Psi \left( \frac{t_i - b_k}{a_j} \right) \Delta t_i, \quad (1)$$

где  $i, j, k$  – индексы дискретизации по времени  $t$ , по масштабу  $a$ , по сдвигу по времени  $b$ ;  $N$  – количество отсчётов входного сигнала;  $M$  – количество масштабов;  $\Delta t_i$  – шаг дискретизации входного сигнала;  $S(t_i)$  – оцифрованный входной сигнал;  $\Psi$  – некоторая вейвлет-функция, удовлетворяющая известным условиям.

Суть алгоритма сводится к разделению вычисления НВП на две стадии: предварительную, на которой вычисляются коэффициенты  $P_{i,j,k}$ :

$$P_{i,j,k} = \left\{ \frac{\Delta t}{\sqrt{a_j}} \Psi \left[ \frac{(i-k)\Delta t}{a_j} \right] \right\}, \quad (2)$$

и основную, на которой итерационно вычисляется дискретизированное НВП вида

$$W^{i+1}(a_j, b_k) = W^i(a_j, b_k) + S(i\Delta t) \cdot P_{i,j,k} \quad (3)$$

с начальным условием

$$W^0(a_j, b_k) = 0. \quad (4)$$

Предварительная стадия включает в себя выбор масштабов, шагов дискретизации и расчёт коэффициентов  $P_{i,j,k}$  по формуле (2), который выполняется один раз и уже существенно снижает время выполнения НВП, которое необходимо повторять многократно в задаче обнаружения. Уменьшение числа  $N$  в формуле (1) также сокращает «мёртвое время», но при этом снижается точность аппроксимации непрерывного вейвлет-преобразования, которая может совершенно исказить результат. Известно, что одним из приёмов ускорения последовательных алгоритмов является частичное перекрытие стадий вычисления [25]. В нашем случае необходимо разработать корректное перекрытие стадий вычислений НВП–ИВС–ПУ, чтобы результат уточнялся по ходу решения. Поэтому нами предлагается, не прерывая вычисления НВП по формулам (1) – (4), делать выборку рассчитанных вейвлет-коэффициентов на некоторых промежуточных шагах по времени и отправлять их на вычисление ИВС и далее на обработку в ПУ. Образно это будет соответствовать постепенному проявлению графического изображения во всей области. Каждая следующая обработка части пакета данных будет показывать уточнённый вейвлет-спектр. Вполне возможны ситуации, когда дальнейшего уточнения уже не нужно и можно принять решение о наличии нескольких кратных максимумов на графике ИВС, т. е. – об обнаружении цели.

Если полный интегральный спектр вычисляется по формуле [20]

$$\bar{W}(a_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [W(a_j, b_k)]^2, \quad (5)$$

то в предлагаемом алгоритме её следует заменить на

$$\bar{W}(a_j) = \sum \Delta W(a_j) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=1}^{n_1} [W(a_j, b_k)]^2 + \sum_{k=n_1+1}^{n_2} [W(a_j, b_k)]^2 + \dots + \sum_{k=n_{m-1}+1}^{n_m} [W(a_j, b_k)]^2 \right\}, \quad (6)$$

где  $n_1, n_2, \dots, n_m$  – количество шагов (сдвигов) по времени, после которого блок ИВС получает данные от блока НВП и передаёт результат вычислений на ПУ;  $\Delta W$  – приращение интегрального вейвлет-спектра по шагам. Для вычисления каждого слагаемого выражения (6) требуется не полный набор, а только часть вейвлет-коэффициентов. Каждое слагаемое правой части выражения (6) дополняет предыдущую сумму и может выводиться на график, по которому можно определять наличие максимумов. При вычислении последнего слагаемого правой части выражения (6) результат будет в точности совпадать с выражением (5), при этом количество операций по формулам (6) и (5) будет одинаково. Таким образом, по формулам (3) и (6) может быть реализовано совмещение вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования, позволяющее на более ранних этапах определять наличие в спектре максимумов и тем самым сократить период «мёртвого времени» в задаче обнаружения узкополосных шумовых сигналов. Корректность определения максимумов при совместном вычислении ИВС и НВП, а также сравнительную оценку выигрыша во времени целесообразно определить на конкретном примере с помощью компьютерного моделирования.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве вейвлет-образующей использовалась функция, известная под названием «мексиканская шляпа» (МНАТ), которая является второй производной функции Гаусса и описывается уравнением

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \left[ \frac{-x^2}{e^{2\sigma^2}} \cdot \left( 1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) \right],$$

где  $x = (t - b)/a$ ;  $\sigma$  – параметр, позволяющий изменять масштаб вейвлета в соответствии с видом входного сигнала. Этот вейвлет имеет узкий энергетический спектр, а нулевой и первый моменты этого вейвлета равны нулю.

Для проверки полученных результатов исследований была составлена программа, соответствующая формулам (1) – (6). Расчёты выполнялись на ПК с процессором Intel® Core™ i7-2600 CPU@3.40GHz под ОС Windows 7 (64). Входной сигнал моделировался с помощью функции

$$S_i = 2 \sin\left(\frac{2\pi}{N}i\right) + 4 \sin\left(\frac{8\pi}{N}i\right) + A \cdot \text{Rnd}(-1,1),$$

где  $A$  – амплитуда дискретного белого шума,  $\text{Rnd}(-1,1)$  – генератор равномерно распределённых случайных чисел в интервале  $-1 \dots 1$ . Амплитуда шума выбиралась такой, чтобы отношение сигнал/помеха было отрицательным, т. е. уровень шума значительно превосходил уровень сигнала, что наблюдается на практике. Графики входных тестовых сигналов с разной амплитудой шума представлены на рис. 1.

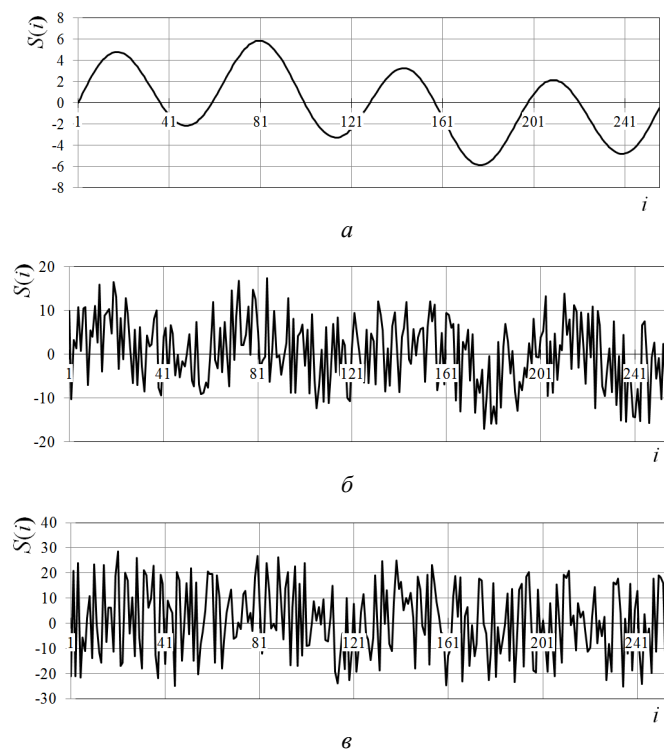


Рис. 1. Тестовые сигналы: без помехи (а); с отношением сигнал/помеха:  $-3$  дБ (б);  $-6$  дБ (в)

Результаты совмещённого вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования для разных тестовых сигналах на различных шагах по времени представлены на рис. 2.

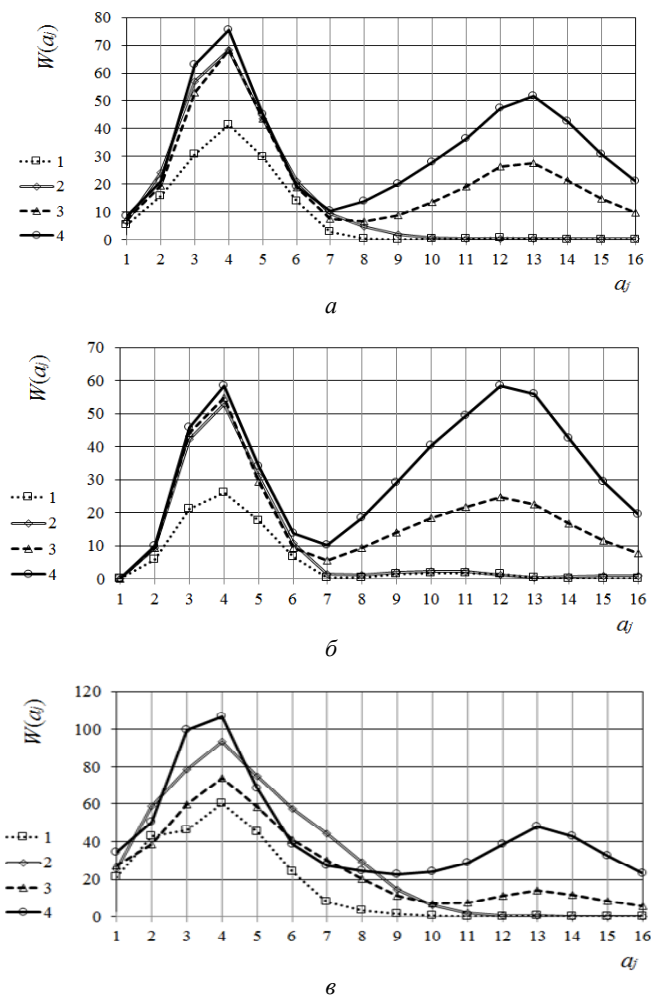


Рис. 2. Распределение интегрального вейвлет-спектра по масштабам на шаге по времени: 1 –  $n_1 = 40$ , 2 –  $n_2 = 60$ , 3 –  $n_3 = 160$ , 4 –  $N = 256$  при уровнях шума: без помехи (а); с отношением сигнал/помеха: –3дБ (б); –6 дБ (в)

По форме графика интегрального вейвлет-спектра можно сделать вывод, что масштабы выбраны правильно и коррекция не требуется. Распределение ИВС по масштабам имеет два чётко выраженных максимума, соответствующих двум тональным частотам во входном сигнале. Критерий обнаружения максимумов заложен в пороговом устройстве, которое подаёт сигнал тревоги и является предметом отдельного исследования. В нашем случае на рис. 2 наглядно видно оба максимума уже на 160 шаге по времени из 256 шагов. Следует отметить, что при увеличении уровня помехи, максимум, соответствующей более низкой частоте (большему масштабу), проявляется менее чётко. Таким образом, этот пример показывает, что совмещение вычисления интегрального вейвлет-спектра с непрерывным вейвлет-преобразованием может ускорить примерно в два раза процедуру обнаружения сигналов в шуме и снизить «мёртвое время». Следует отметить, что этот алгоритм может найти применение не только в гидролокации, но и в других областях, требующих решения задач обнаружения сигналов. Например, в специальных системах связи и мониторинга труднодоступных и подвижных объектов [26], в системах обнаружения и мониторинга лесных пожаров [27] и др.

## ВЫВОДЫ

Описан алгоритм совмещённого вычисления интегрального вейвлет-спектра и непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных сигналов в широкополосном шуме. Показано, что совмещение вычисления по предложенному алгоритму последовательно уточняет вейвлет-спектр. Это позволяет принять решение о наличии в нем нескольких кратных максимумов (признак обнаружения цели) до окончания полного цикла непрерывного вейвлет-преобразования, что сокращает общее время расчёта и снижает «мёртвое время». Приведён пример, показывающий корректность алгоритма на двух тестовых сигналах с отрицательным отношением сигнал/помеха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Daubechies I.** The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis // *IEEE Trans. Inform. Theory*. – 1990. – Vol. 5. – P. 961–1005.
- [2] IEEE Xplore Digital Library [Electronic resource]. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (дата обращения: 09.03.2014).
- [3] A new method to detect voltage sag based on wavelet energy entropy / C.G. Wang, L.C. Wang, J. Liu, B. Liu // *Appl. Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 448–453. – P. 2254–2258.
- [4] **Zhou Y.-L., Wang F.** Envelop spectrum analysis of pressure fluctuation based on wavelet decomposition // *Appl. Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 448–453. – P. 3392–3396.
- [5] Research on technology of gas pipeline leakage detection based on infrasonic wave / Y.-Q. Wang, S. Wan, Y.-C. Zhou, H.-G. Yang // *Appl. Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 401–403. – P. 1106–1109.
- [6] **Guo X.-J., Yang X.Y., Yu Z.-J.** Foreign object debris detection on the runway based on wavelet method // *Appl. Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 427–429. – P. 1658–1661.
- [7] **Chandra N.H., Sekhar A.S.** Damage identification and quantification in structures using wavelet analysis // *Appl. Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 471. – P. 187–192.
- [8] Пат. 2188939 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> E21B 44/06, E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / В.У. Ямалиев, М.М. Хасанов, Р.Н. Якулов, Е.И. Ишемгузин, И.Р. Кузеев, Д.С. Солодовников; заявитель и патентообладатель О-во с огранич. ответственностью «ЮганскНИПИнефть». – № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25. – 6 с.
- [9] Пат. 2154813 Российская Федерация, МПК G01M 15/00. Способ диагностики работы двигателя / И.М. Дремин, В.И. Фурлетов, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло, В.Г. Терзиев; заявитель и патентообладатель Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева Рос. акад. наук. – № 99105603/06; заявл. 19.03.1999; опубл. 20.08.2000, Бюл. № 23. – 7 с.
- [10] **Полищук В.И., Хамухин А.А.** Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 85–93.
- [11] Численное моделирование динамических процессов в электроэнергетических системах как инструмент стратегического управления / Ю.В. Шорников, И.Н. Томилов, Д.Н. Достовалов, М.С. Денисов // *Науч. вестн. НГТУ*. – 2011. – № 4. – С. 129–132.
- [12] Математическое и программное обеспечение численного анализа режимов электрических машин / И.Н. Томилов, Д.Н. Достовалов, В.В. Пастухов, Ю.В. Шорников // *Системы упр. и информ. технологии*. – 2011. – Т. 45, № 3.1. – С. 204–208.
- [13] Пат. 2495444 Российская Федерация, МПК G01R 31/00 (2006.01). Способ диагностики состояния асинхронного электродвигателя / А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, В.И. Полищук; заявитель и патентообладатель Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. – № 2012116348/28; заявл. 23.04.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 12 с.
- [14] **Dyomin A.Yu., Marchuk S.M., Reizlin V.I.** Simulating a non-spherical surface profile // *Proceedings of the 9-th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology (KORUS 2005)*, Novosibirsk, Russia, June 26 – July 2, 2005. – Novosibirsk: State Technical Univ. Publ. (NSTU), 2005. – Vol. 1. – P. 592–593.
- [15] Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трёхфазных электрических машин по статорным токам / В.В. Тимошкин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук, А.С. Глазырин // *Электричество*. – 2012. – № 6. – С. 42–46.
- [16] **Leigh G.M.** Fast FIR Algorithms for the Continuous Wavelet Transform from Constrained Least Squares // *IEEE Trans. on Signal Processing*. – 2013. – Vol. 61. – P. 28–37.
- [17] Пат. 2437147 Российская Федерация, МПК G06F 17/14 (2006.01). Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования / А.А. Хамухин; заявитель и патентообладатель Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. – № 2010127068/08; заявл. 01.07.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 9 с.
- [18] **Демин А.Ю., Рейзлин В.И.** Анализ программного обеспечения на основе структурно-графического представления // *Проблемы информатики*. – 2011. – № 5. – С. 6–15.
- [19] Пат. 2367970 Российская Федерация, МПК G01S3/80 (2006.01). Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра / В.А. Сапрыкин, В.В. Малый, Г.В. Шаталов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Воен.-мор. акад. им. адм. флота Совет. Союза Н.Г. Кузнецова. – № 2007145474/28; заявл. 28.11.2007; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26. – 27 с.
- [20] Пат. 2464588 Российская Федерация, МПК G01S3/80 (2006.01). Устройство обнаружения шумовых гидроакустических сигналов в виде звукоряда на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра / В.В. Малый, В.А. Сапрыкин, А.Ю. Рохманийко, В.С. Есипов, К.В. Якунин; заявитель и патентообладатель В.В. Малый. – № 2011126056/28; заявл. 15.06.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 26 с.
- [21] **Хамухин А.А.** Применение ячеек однородной структуры в задаче обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2013. – Т. 322, № 5. – С. 68–82.

- [22] Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
- [23] Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 317, № 5. – С. 149–153.
- [24] Хамухин А.А. Итерационный алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования // Вестн. компьютер. и информ. технологий. – 2013. – № 3. – С. 9–13.
- [25] Ауканат С. Efficient Overlapped Algorithms for Hypercube-connected Multicomputers // Intern. J. of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 1994. – Vol. 4, № 1-2. – P. 91–110.
- [26] Сонькин М.А., Ямпольский В.З. Обобщённые свойства специальных систем связи и мониторинга для труднодоступных и подвижных объектов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 154–156.
- [27] Сонькин М.А., Лешик Ю.В. Применение алгоритмов нечёткого поиска в системах мониторинга лесопожарной обстановки // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 98–101.

*Хамухин Александр Анатольевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и проектирования систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Основное направление научных исследований – математическое моделирование, разработка алгоритмов анализа данных. Имеет более 70 публикаций. E-mail: aaxtru@tpu.ru.

### ***Concurrent computation of the integrated wavelet spectrum and continuous wavelet transform when detecting narrowband noise signals***\*

A. KHAMUKHIN

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD., e-mail: aaxtru@tpu.ru

The urgency of the discussed issue is caused by the need to improve methods for early detection of objects by their noise. The main aim of the study is to reduce the "dead time" in the problem of detecting objects by their noise, i.e. to reduce the implementation time of conventional sequential computation steps, i.e. the computation of the continuous wavelet transform and the integrated wavelet spectrum, as well as the detection of maximums in the threshold device (by modifying the algorithms and overlapping computational step). The methods used in the study include mathematical transformation to compute concurrently the overlapped discretized wavelet transform and integral wavelet spectrum. Computer modeling is carried out to detect objects with different test noises. The results obtained show a decrease in the total computation time when detecting narrowband signals by means of a successive correction of the wavelet spectrum due to the overlap of its computation and the continuous wavelet transform. An example of mathematical modeling of two test signals detection in a discrete white noise with a negative signal-to-noise ratio of  $-3$  to  $-6$  dB is given indicating that the overlap integral wavelet spectrum and continuous wavelet transform calculation makes it possible to detect both signals in the noise already at the 160th time step out of 256 time steps of a full cycle.

**Keywords:** continuous wavelet transform, integrated wavelet spectrum, narrowband noise, detecting, overlap calculations, wavelet, signal-to-noise ratio, mathematical modeling

#### REFERENCES

- [1] Daubechies I. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. IEEE Trans. Inform. Theory, 1990, vol. 5, pp. 961-1005.
- [2] IEEE Xplore Digital Library. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> (Accessed 9 March 2014).
- [3] Wang C.G., Wang L.C., Liu J., Liu B. A new method to detect voltage sag based on wavelet energy entropy. Appl. Mechanics and Materials, 2014, vol. 448-453, pp. 2254-2258.
- [4] Zhou Y.-L., Wang F. Envelop spectrum analysis of pressure fluctuation based on wavelet decomposition. Appl. Mechanics and Materials, 2014, vol. 448-453, pp. 3392-3396.
- [5] Wang Y.-Q., Wan S., Zhou Y.-C., Yang H.-G. Research on technology of gas pipeline leakage detection based on infrasonic wave. Appl. Mechanics and Materials, 2013, vol. 401-403, pp. 1106-1109.
- [6] Guo X.-J., Yang X.Y., Yu Z.-J. Foreign object debris detection on the runway based on wavelet method. Appl. Mechanics and Materials, 2013, vol. 427-429, pp. 1658-1661.
- [7] Chandra N.H., Sekhar A.S. Damage identification and quantification in structures using wavelet analysis. Appl. Mechanics and Materials, 2014, vol. 471, pp. 187-192.
- [8] Yamaliev V.U., Khasanov M.M., Yakulov R.N., Ishemguzhin E.I., Kuzeev I.R., Solodovnikov D.S. *Sposob opredeleniya rabotosposobnosti porodorazrushayushchego instrumenta* [Method of determining rock-cutting tool serviceability]. Patent RF, no. 2188939, 2002.
- [9] Dremine I.M., Furlitov V.I., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A., Terziev V.G. *Sposob diagnostiki raboty dvigatelya* [Engine operation diagnosing method]. Patent RF, no. 2154813, 2000.

\* Manuscript received February 3, 2014.

The work was done in the framework of a state programme "Science"



- [10] Polishchuk V.I., Khamukhin A.A. Vyyavlenie vitkovykh замыkaniy obmotki rotora sinkhronnogo generatora na osnove veyvlet-analiza magnitnykh potokov rasseyaniya [The impact of turn-to-turn short circuits of synchronous generator rotor winding based on wavelet analysis of leakage flux]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 323, no. 5, pp. 85-93.
- [11] Shornikov Yu.V., Tomilov I.N., Dostovalov D.N., Denisov M.S. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektroenergeticheskikh sistemakh kak instrument strategicheskogo upravleniya [Numerical modeling of dynamic processes in power systems as a strategic management tool]. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2011, vol. 4, pp. 129-132.
- [12] Tomilov I.N., Dostovalov D.N., Pastukhov V.V., Shornikov Yu.V. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie chislennogo analiza rezhimov elektricheskikh mashin [Mathematical and numerical analysis software for modes of electrical machines]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii – Management systems and information technologies*, 2011, vol. 45, no. 3.1, pp. 204-208.
- [13] Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Polishchuk V.I. *Sposob diagnostiki sostoyaniya asinkhronnogo elektrodvigatelya* [Condition diagnosis method for asynchronous motor]. Patent RF, no. 2495444, 2013.
- [14] Dyomin A.Yu., Marchuk S.M., Reizlin V.I. Simulating a non-spherical surface profile. Proceedings of the 9-th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology (KORUS-2005), Novosibirsk, Russia, June 26 - July 2, 2005. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005, vol. 1, pp. 592-593.
- [15] Timoshkin V.V., Glazyrina T.A., Polishchuk V.I., Glazyrin A.S. Funktsionalnaya veyvlet-diagnostika sostoyaniya obmotok rotorov trekhfaznykh elektricheskikh mashin po statornym tokam [A functional wavelet-diagnostics of the rotor winding condition three-phase electric machines by stator currents]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2012, no. 6, pp. 42-46.
- [16] Leigh G.M. Fast FIR Algorithms for the continuous wavelet transform from constrained least squares. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, vol. 61, pp. 28-37.
- [17] Khamukhin A.A. *Ustroystvo dlya vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya* [Device to calculate discretized continuous wavelet transform]. Patent RF, no. 2437147, 2011.
- [18] Demin A.Yu., Reyklin V.I. Analiz programmnogo obespecheniya na osnove strukturno-graficheskogo predstavleniya [Analysis software based on the structural and graphical representation]. *Problemy informatiki – Problems of Informatics*, 2011, no. 5, pp. 6-15.
- [19] Saprykin V.A., Malyy V.V., Shatalov G.V. *Ustroystvo obnaruzheniya uzkopolosnykh shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove vychisleniya integralnogo veyvlet-spektra* [Device for detection of narrow-band noise hydroacoustic signals based on calculation of integral wavelet-spectrum]. Patent RF, no. 2367970, 2009.
- [20] Malyy V.V., Saprykin V.A., Rokhmaniyo A.Yu., Esipov V.S., Yakunin K.V. *Ustroystvo obnaruzheniya shumovykh gidroakusticheskikh signalov v vide zvukoryada na osnove vychisleniya integralnogo veyvlet-spektra* [Apparatus for detecting hydroacoustic noise signals in form of sequence of sounds based on calculating integral wavelet spectrum]. Patent RF, no. 2464588, 2012.
- [21] Khamukhin A.A. Primenenie yacheek odnorodnoy struktury v zadache obnaruzheniya shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove integralnogo veyvlet-spektra [Application of homogeneous structure cell when detecting noise hydroacoustic signals based on integrated wavelet spectrum]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 322, no. 5, pp. 68-82.
- [22] Khamukhin A.A. Matematicheskaya model yacheyki odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [A mathematical model of cell homogeneous structure for calculation of the continuous wavelet transform]. *Problemy informatiki – Problems of Informatics*, 2011, no. 5, pp. 87-93.
- [23] Khamukhin A.A. Primenenie yacheek odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [Application of a homogeneous structure of cells to calculate the continuous wavelet transform]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2010, vol. 317, no. 5, pp. 149-153.
- [24] Khamukhin A.A. Iteratsionnyy algoritm vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [An iterative algorithm for computing the discretized continuous wavelet transform]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy – Bulletin of computer and information technologies*, 2013, no. 3, pp. 9-13.
- [25] Aykanat C. Efficient Overlapped Algorithms for Hypercube-connected Multicomputers. *Intern. J. of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 1994, vol. 4, no. 1-2, pp. 91-110.
- [26] Sonkin M.A., Yampolskiy V.Z. Obobshchyonnye svoystva spetsialnykh sistem svyazi i monitoringa dlya trudnodostupnykh i podvizhnykh obektov [Generalized properties of special communication systems and monitoring for remote and mobile objects]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2008, vol. 312, no. 2, pp. 154-156.
- [27] Sonkin M.A., Leshchik Yu.V. Primenenie algoritmov nechuyotkogo poiska v sistemakh monitoringa lesopozharnoy obstanovki [Application of fuzzy search algorithms in monitoring forest fire situation]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 5, pp. 98-101.