

МОДИФИКАЦИЯ ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРА

А. А. Хамухин

Институт кибернетики Национального исследовательского
Томского политехнического университета, 634050, Томск, Россия

УДК 519.673

Предложена модифицированная схема однородной вычислительной структуры для распараллеливания и ускорения вычисления непрерывного вейвлет-преобразования и интегрального вейвлет-спектра. Показана возможность модификации всей структуры без изменения схем составляющих ее ячеек. Представлены результаты моделирования обнаружения дискретных составляющих спектра гидроакустических шумов на основе интегрального вейвлет-спектра с помощью модифицированной однородной структуры.

Ключевые слова: однородная вычислительная структура, параллельные вычисления, вейвлет-спектр, непрерывное вейвлет-преобразование.

The modified scheme of homogeneous computing structures for parallel computing and accelerate a continuous wavelet transform and a wavelet spectrum. Modifying the entire structure without changing the patterns of its constituent cells. The simulation results of detection of the wavelet spectrum discrete components from a sonar noise on the basis of the using the modified homogeneous structure.

Key words: homogeneous computing structure, parallel computation, wavelet spectrum, continuous wavelet transform.

Известно, что однородные вычислительные структуры (ОВС) с непрограммируемыми синхронно работающими ячейками позволяют добиться наибольшей производительности параллельных вычислений при прочих равных условиях, но предназначены только для решения специализированных задач [1–3]. В работах [4, 5] описана математическая модель ячейки однородной вычислительной структуры для параллельного синхронного вычисления непрерывного вейвлет-преобразования, приведены функциональные схемы отдельной ячейки и однородной структуры в целом. Перевод ОВС на решение новой задачи всегда требует значительных затрат времени и ресурсов, поскольку ему предшествует модификация схем.

Однако существует ряд задач, в которых такие затраты оправданы, например задача обнаружения шумовых гидроакустических сигналов, излучаемых движущимися в воде объектами (подводными лодками или надводными судами). Задержка обнаружения таких объектов за счет низкой скорости обработки результатов измерения гидроакустических шумов может привести к тому, что сам факт обнаружения станет неактуальным. Эта задача исследуется на протяжении

нескольких десятилетий, что обусловлено, с одной стороны, попытками снижения излучаемых объектами шумов и, с другой – развитием аппаратуры и методов обработки шумовых сигналов [6–8]. В работе [9] подробно рассматривается решение этой задачи на основе недавно разработанного метода вычисления интегрального вейвлет-спектра шумового гидроакустического сигнала. Приводятся функциональная схема устройства и результаты компьютерного моделирования, показывающие преимущество предлагаемого метода по сравнению с традиционно используемым для решения этой задачи методом преобразования Фурье.

Следует отметить, что вычисление интегрального вейвлет-спектра основано на непрерывном вейвлет-преобразовании (НВП) анализируемого сигнала, которое требует больших вычислительных затрат [10]. Для ускорения вычисления вейвлет-преобразования (ВП) разработано и продолжает разрабатываться большое количество методов: ВП на основе быстрого преобразования Фурье, дискретное вейвлет-преобразование, диадное ВП и др. [11]. Однако для всех этих методов характерна частичная потеря информации при вычислении, что также может снизить эффективность обнаружения шумовых гидроакустических сигналов. Поэтому для данного класса задач важно сохранить классическое непрерывное вейвлет-преобразование и уменьшить время его расчета за счет других средств.

Алгоритм задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра основан на многократном повторении НВП входного сигнала, вычислении интегрального вейвлет-спектра (скалограммы) и определении максимумов на этой скалограмме. Эта задача отличается от тех задач, которые решались с помощью ОВС ранее, поэтому она может потребовать изменения уже разработанных схем.

Цель настоящей работы – модифицировать ОВС таким образом, чтобы изменения в схемах были минимальными. Это позволит ускорить разработку. В частности, желательно сохранить уже разработанные схемы самих ячеек и ограничиться модификацией схемы ОВС.

Для достижения поставленной цели рассмотрим алгоритм обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра подробнее. Основными источниками шумовых гидроакустических сигналов являются энергетическая установка, гребные винты, вспомогательные механизмы (насосы, генераторы и т. п.), гидродинамические эффекты, возникающие при обтекании жидкостью корпуса объекта. Итоговый шум считают состоящим из двух компонент: широкополосного шума с непрерывным спектром частот и узкополосного шума, имеющего прерывистый (линейчатый) спектр. В задаче обнаружения вторую составляющую гидроакустического шума считают полезным сигналом на фоне аддитивной помехи (первой составляющей гидроакустического шума) [1].

Алгоритм обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра включает следующие этапы [9].

1. Измерение шумового гидроакустического сигнала, который может состоять из нескольких узкополосных полезных сигналов с центральными частотами $1 \div 20$ Гц и аддитивной широкополосной помехи.

2. Оцифровка по времени t поступающего входного сигнала $S(t)$ с шагом дискретизации Δt , который должен удовлетворять требованию теоремы Котельникова – Найквиста

$$f_d = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_{\max},$$

где f_d – частота дискретизации входного сигнала; f_{\max} – максимальная частота, которой ограничен спектр полезной составляющей входного сигнала.

3. Непрерывное вейвлет-преобразование оцифрованного входного сигнала $S(t_i)$ и получение значений $W(a_j, b_k)$, где i, j, k – индексы по времени t , масштабу a , сдвигу по времени b ; N – количество шагов по времени i ; M – количество масштабов j .

4. Вычисление интегрального вейвлет-спектра (ИВС):

$$\hat{W}(a_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |W(a_j, b_k)|^2 \Delta t. \quad (1)$$

5. Определение местоположений локальных максимумов ИВС, которые и являются обнаруженными полезными сигналами.

В работе [9] п. 3 изложенного выше алгоритма реализуется через ряд операций: вычисление спектра Фурье входного сигнала, перемножение полученного спектра Фурье с сопряженным базисом отмасштабированных спектров аналитических вейвлетов, вычисление обратного преобразования Фурье от результата последнего перемножения. Такое усложнение предпринято с целью применения алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), ускоряющего процесс вычисления на последовательном процессоре. Однако при распараллеливании вычисления НВП и реализации этого вычисления с помощью однородной вычислительной структуры можно избежать этого усложнения и использовать формулу [5]

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

или (для дискретизированного входного сигнала)

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

где $\Psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ – некоторая функция с определенными свойствами (вейвлет).

Для задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов помимо вычисления НВП требуется вычисление интегрального вейвлет-спектра и определение максимумов этого спектра, которые соответствуют обнаруженным дискретным составляющим входного сигнала.

Анализ возможных схемных решений данной задачи показывает, что схему самой ячейки для вычисления НВП можно оставить без изменений, а модификацию внести в схему ОВС. Такой подход позволит использовать одни и те же вычислительные ячейки для решения других задач путем перенастройки и дополнения схемы всей однородной вычислительной структуры.

Значения непрерывного вейвлет-преобразования $W(a_j, b_k)$ при вычислении на ОВС получают в матрице ячеек размером $M \times N$. Количество масштабов M значительно меньше количества отсчетов N анализируемого входного сигнала, поэтому целесообразно связать ОВС с устройством управления (УУ) параллельно по M каналам.

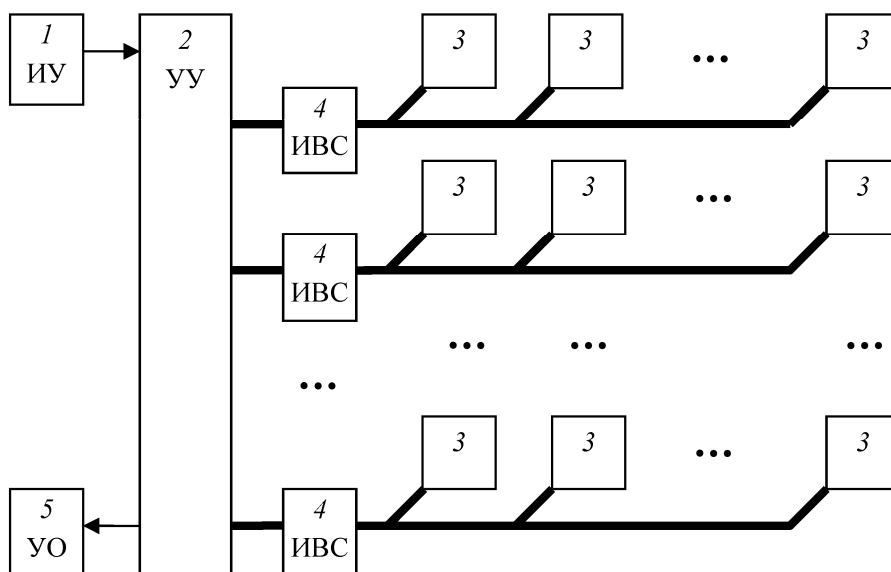


Рис. 1. Функциональная схема однородной структуры для решения задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра:

1 – устройство измерения анализируемого сигнала (ИУ), 2 – устройство управления (УУ), 3 – ячейка однородной вычислительной структуры, 4 – блок вычисления интегрального вейвлет-спектра (ИВС), 5 – устройство отображения обнаруженных шумовых гидроакустических сигналов (УО)

Можно возложить операции вычисления ИВС по формуле (1) на само УУ, но такой объем вычислений существенно увеличит общее время решения задачи обнаружения. Поэтому на M каналах между УУ и ОВС требуется поставить блок для параллельного вычисления интегрального вейвлет-спектра. Таким образом, ввод блока вычисления ИВС на каждом канале позволит передавать в устройство управления массив размером M вместо массива размером $M \times N$. Это возможно в рамках настоящей задачи, поскольку сами значения $W(a_j, b_k)$ после вычисления интегрального вейвлет-спектра для задачи обнаружения не нужны.

Такое решение позволит сократить объем передаваемой для обработки в УУ информации и ускорить весь цикл расчета, поскольку в качестве УУ применяется обычный микропроцессор (с контроллером) и повышенная вычислительная нагрузка на него может снизить эффект от распараллеливания операций в ОВС. Таким образом, на УУ добавляется незначительная нагрузка вычисления локальных максимумов на M числах. Модифицированная схема ОВС представлена на рис. 1.

Анализируемый входной сигнал $S(t)$ измеряется в измерительном устройстве (ИУ) и в оцифрованном виде передается в устройство управления УУ. Устройство управления распределяет этот сигнал по M каналам для передачи их в ячейки однородной вычислительной структуры 3.

При передаче данных от УУ к ячейкам 3 блок ИВС не проводит вычислений и пропускает данные в каналы доступа к ячейкам 3. При передаче данных от ячеек в УУ (это результат вычисления НВП) блоки ИВС на каждом из M каналов, соединяющих их с линейками из N ячеек, выполняют операции в соответствии с формулой (1) и передают результаты в УУ. Устройство управления среди полученных N чисел определяет локальные максимумы и передает их в устройство отображения (УО) обнаруженных шумовых гидроакустических сигналов.

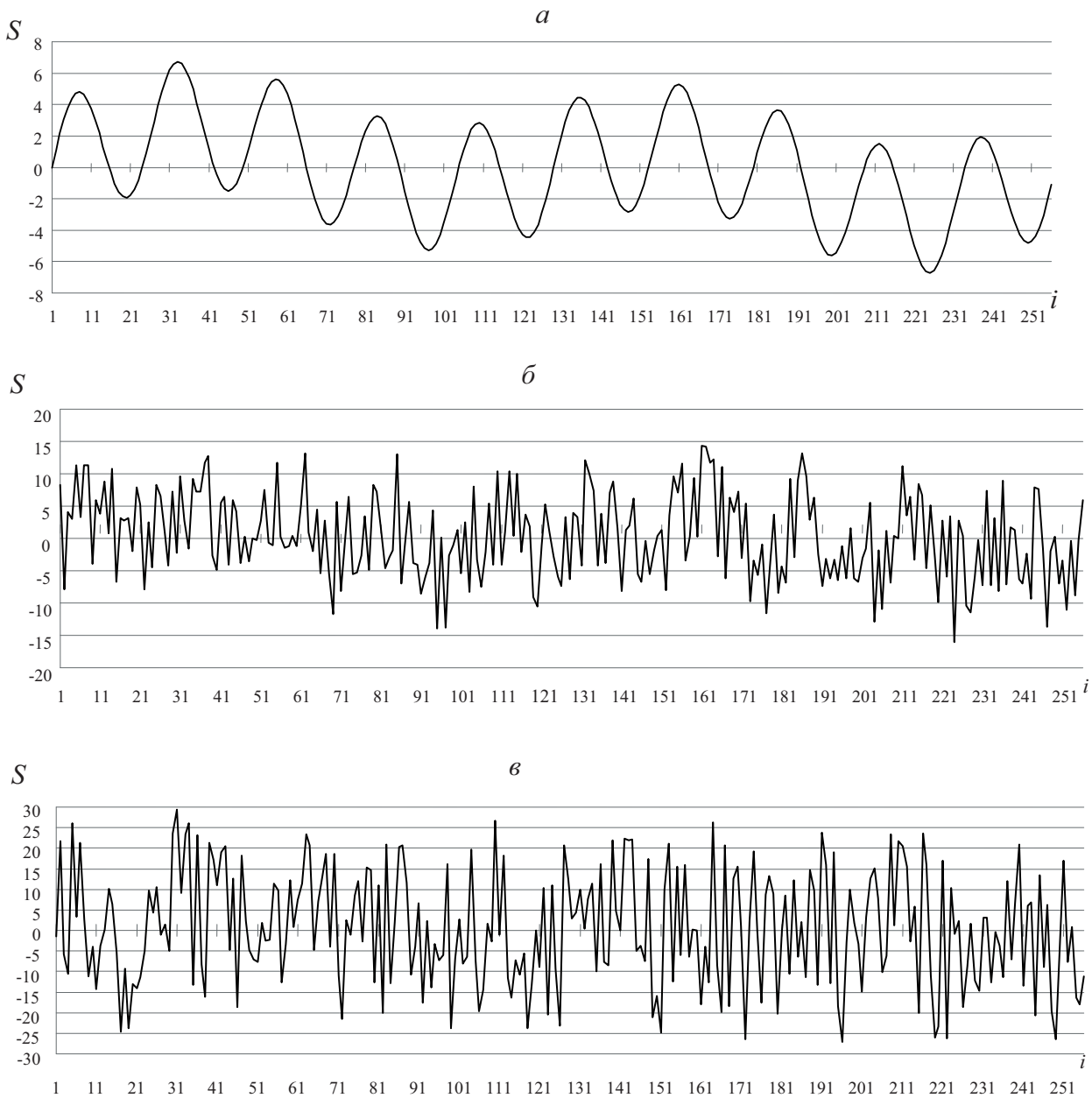


Рис. 2. Анализируемый входной сигнал без помехи (*a*) и с помехами по амплитуде 6 дБ (*б*) и 10 дБ (*в*)

Для проверки работоспособности схемы, представленной на рис. 1, была создана компьютерная модель в среде Excel на языке программирования VBA. Для тестирования алгоритма был выбран входной сигнал с тремя дискретными составляющими, подлежащими обнаружению. Количество отсчетов входного сигнала $N=256$, количество масштабов $M=16$, шаг $\Delta t = 1$ с.

В качестве материнского вейвлета использовалась функция, известная под названием "мексиканская шляпа" (МНАТ) [11].

Таким образом, моделируемая схема ОВС состояла из матрицы одинаковых вычислительных ячеек размером 16×256 и 16 блоков вычисления интегрального вейвлет-спектра. Расчеты проводились на микропроцессоре Intel Core i7 3,40 GHz под управлением Windows 7(64).

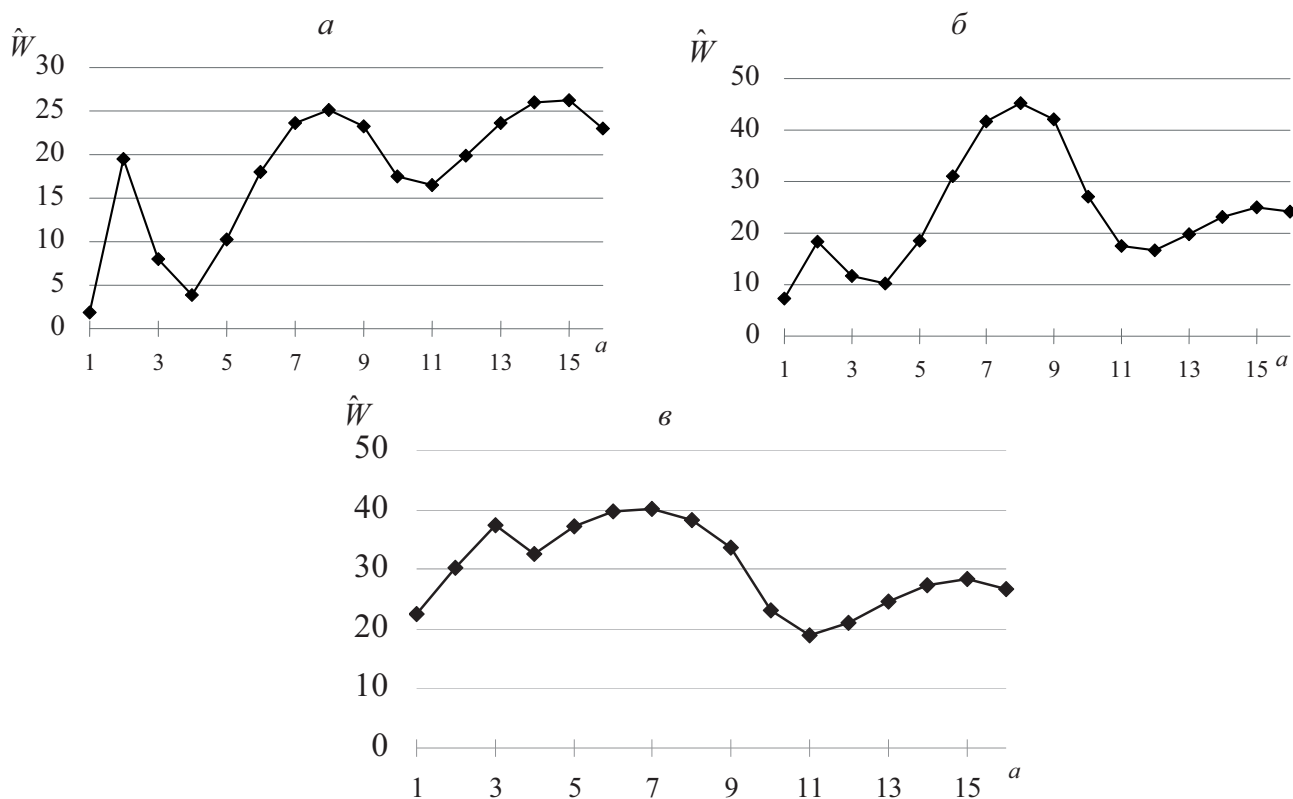


Рис. 3. Расчетный интегральный вейвлет-спектр для входных сигналов без помехи (а) и с помехами по амплитуде 6 дБ (б) и 10 дБ (в)

Входной сигнал $S(t)$ моделировался в виде суммы трех гармоник (с частотами 1, 2 и 10 Гц) с аддитивной помехой в виде модели дискретного белого шума. Анализируемые входные сигналы с различным уровнем помехи представлены на рис. 2.

Полученный на моделируемой схеме ОВС интегральный вейвлет-спектр для представленных выше входных сигналов показан на рис. 3. Частоты 1, 2 и 10 Гц соответствуют значениям $a = 15, 8, 2$ на графиках.

Из рис. 3 следует, что расчетный интегральный вейвлет-спектр входного сигнала без помехи содержит три локальных максимума, соответствующих трем гармоникам, из которых он состоит. С увеличением уровня помехи максимум становится менее четко выраженным, но до уровня помехи 6 дБ по амплитуде все три локальных максимума определяются правильно. При уровне помехи 10 дБ эффективность определения локальных максимумов существенно снижается. Однако само их наличие на интегральном вейвлет-спектре позволяет зафиксировать факт обнаружения источника гидроакустических шумов. Такой результат характерен в целом для метода обнаружения дискретных составляющих на основе интегрального вейвлет-спектра и не является следствием применения модифицированной ОВС для параллельного вычисления непрерывного вейвлет-преобразования.

Заключение. Модифицированная схема однородной вычислительной структуры для задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра позволяет использовать разработанные ранее схемы ячеек. Результаты моделирования тестовой задачи обнаружения дискретных составляющих гидроакустических шумов на основе мно-

гократного непрерывного вейвлет-преобразования и вычисления интегрального вейвлет-спектра свидетельствуют об эффективности модифицированной схемы однородной структуры.

Список литературы

1. ХАМУХИН А. А. Ячеечная модель устройства для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Изв. Том. политехн. ун-та. 2010. Т. 316, № 5. С. 62–67.
2. ХАМУХИН А. А. Реконфигурирование однородной вычислительной структуры с непрограммируемыми ячейками для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Изв. Том. политехн. ун-та. 2010. Т. 316, № 5. С. 68–72.
3. ХАМУХИН А. А. Адресуемая ячейка однородной вычислительной структуры для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Изв. Том. политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 5. С. 25–30.
4. ХАМУХИН А. А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Пробл. информатики. 2011. № 5. С. 87–93.
5. Пат. 2437147 РФ, МПК G 06 F 17/14 (2006.01). Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования / А. А. Хамухин. № 2010127068/08; Заявл. 01.07.10; Оpubл. 20.12.11, Бюл. № 35.
6. БУРДИК В. С. Анализ гидроакустических систем. Л.: Судостроение, 1988.
7. КАЛЮ В. А. Автоматический мониторинг подводного шума судов с помощью искусственной нейронной сети // Российский фонд фундаментальных исследований, грант № 11-08-00402. 2011. [Электрон. ресурс]. http://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n_549/o_41432.
8. КАЛЮ В. А., НЕВОРОТИН В. Ю., ПРАВДИН А. А. Повышение точности локализации дискретных составляющих спектра шума движущегося транспортного средства // Техн. акустика. 2012. № 3. <http://www.ejta.org/ru/kalyu1>.
9. Пат. 2367970 РФ, МПК G 01 S 3/80 (2006.01). Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра / В. А. Сапрыкин, В. В. Малый, Г. В. Шаталов. № 2007145474/28; Заявл. 28.11.07; Оpubл. 20.09.09, Бюл. № 26.
10. ХАМУХИН А. А. О параллельном вычислении непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра // Техн. акустика. 2012. № 5. <http://ejta.org/ru/khamukhin1>.
11. ЯКОВЛЕВ А. Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2003.

*Хамухин Александр Анатольевич – канд. техн. наук, доц. Института кибернетики
Томского политехнического университета; тел.: (382-2)42-04-05; e-mail: aaxtpu@tpu.ru*

Дата поступления – 17.10.12 г.