

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА МНОГОУРОВНЕВОЙ ДИСКРЕТНОЙ ВЕЙВЛЕТ – ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА И СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ БАЗЫ ФИЛЬТРОВ

Материал представленный в статье является продолжением исследований по применению вейвлет-технологии в области обработки эхосигнала в радиолокационных системах обнаружения воздушных объектов, а именно решения задачи углового разрешения парной сосредоточенной цели (определённую, как "сверхразрешение") методом пороговой обработки результатов вейвлет-декомпозиции сигналов.

В статье обосновано построение и представлен алгоритм многоуровневой дискретной вейвлет-фильтрации по пирамидальному алгоритму Малла. Разработан синтез оптимального алгоритма построения вейвлет-декомпозиции на основе пакетных вейвлетов.

Ключевые слова: радиолокационный сигнал, вейвлет-анализ, пакетное вейвлет-преобразование.

Введение. Теория вейвлетов является частью прикладной математики. Математический характер многих теоретических положений вейвлет-анализа не позволяет дать прозрачную физическую интерпретацию многих вычислительных процедур, особенно дискретной версии вейвлет-преобразования (ВВП), которая имеет существенные отличия в организации техники вычислительных операций по сравнению с известным дискретным преобразованием Фурье [1].

Понятие вейвлет-фильтр относится к классу адаптивных фильтров с переменными параметрами, то есть не обладающими свойством стационарности, и определяется как последовательности h_n и g_n [2]. Основным элементом системы (банка) фильтровой обработки является пара фильтров: низкочастотный (НЧ) фильтр и высокочастотный (ВЧ) фильтр [3]. С точки зрения теории радиотехнических систем последовательности h и g являются дискретными импульсными характеристиками квадратурно-зеркальных фильтров $h(n)$ и $g(n)$ [4].

Конечной задачей представленных в статье частных результатов исследования является разработка метода распознавания типа принятого сигнала тестового варианта сосредоточенной цели (парной цели) на основании пороговой оценки числового показателя, характеризующего результат вейвлет-декомпозиции эхосигнала. При определении такого показателя задача распознавания – разрешения парной цели решается классическим методом сравнения полученного при обработке показателя с эталонным значением, хранящемся в базе данных, и последующей пороговой обработке.

Построение алгоритма многоуровневой дискретной вейвлет-фильтрации. Дискретное ВВП (ДВВП) реализуется только на основе частотной фильтрации системой дискретных фильтров, позволяющей организовать алгоритм быстрого преобразования. Дискретный вейвлет-анализ позволяет реализовать быстрое ДВВП по пирамидальному алгоритму Малла [4].

Процедура анализа стартует с масштаба $a = 1$ (a – параметр вейвлет-преобразования задающий ширину пакета; $a^{-\frac{1}{2}}\psi_0\left(\frac{t}{a}\right)$, $a > 0$, $a \in \mathbb{R}$, где ψ_0 – исходная базовая функция), соответствующего высоким частотам (наиболее сжатый вейвлет) и при увеличении " a " продолжается в сторону низких частот. Процедура свёртки (сигнал×вейвлет) выполняется для всех отсчётов сигнала формируя первую строку масштабно-временной плоскости с коэффициентами cA_1 и cD_1 . После полуполосного НЧ фильтра половина отсчётов удаляется операцией децимации. Децимация не изменяет разрешения, так как согласно теореме отсчётов удаляемые отсчёты являются избыточными и не несут информации. На следующем

шаге производится разложение только коэффициентов аппроксимации cA_1 по той же схеме, а коэффициенты cD_1 записываются в выходной сигнал.

Структурная схема алгоритма многоуровневой фильтрации дискретного сигнала приведена на рис. 1.

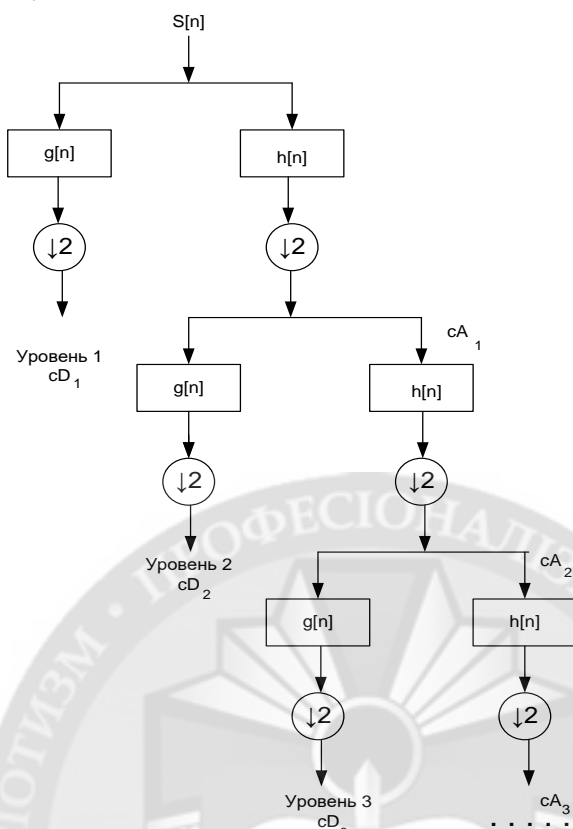


Рис. 1. Структурная схема алгоритма многоуровневой фильтрации дискретного сигнала

Синтез оптимального алгоритма построения вейвлет-декомпозиции на основе пакетных вейвлетов. ДВВП по алгоритму Малла, как следует из схемы рис. 1, на каждом шаге производит октавополосное "расщепление" сигнала на НЧ и ВЧ составляющие и "отсечение" ВЧ составляющих. Причина такого подхода заключается в неявном предположении о том, что НЧ составляющие содержат больше информации. В результате получается однобокое "дерево", которое используется для наглядного представления последовательности операций алгоритма обработки. Вид "дерева" показан на рис. 2 для тестового сигнала и вейвлета Добеши 4 порядка.

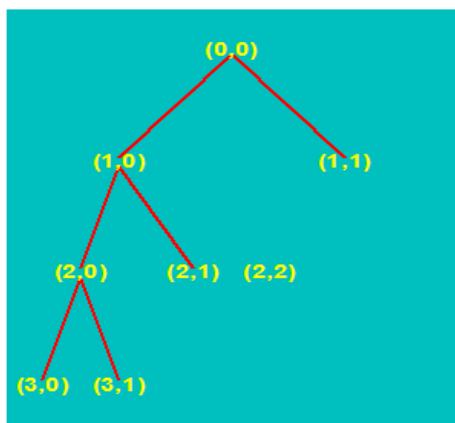


Рис. 2. Вид "дерева" дискретного вейвлет-преобразования по алгоритму Малла для тестового сигнала и вейвлета Добеши 4 порядка

Такой алгоритм построения системы декомпозиции сигнала с точки зрения информативности оценки составляющих оправдан не для всех реальных сигналов, особенно нестационарных и имеющих существенные локальные изменения.

Позднее предложен (Койфман и Викерхаузер) усовершенствованный метод, в котором процесс расщепления применяется как для НЧ, так и ВЧ составляющих. В результате получается полное (бинарное или сбалансированное) "дерево" разложения сигнала. Набор базисов построения такого алгоритма называют вейвлет-пакетами. Преобразование с помощью вейвлет-пакетов является адаптивным, то есть легко приспособляется к особенностям сигнала [5].

Вид "дерева" для того же базового вейвлета и тестового сигнала показано на рис. 3.

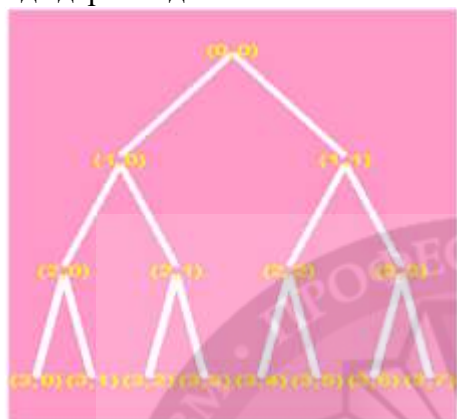


Рис. 3. Вид "дерева" дискретного вейвлет-преобразования с помощью вейвлет-пакетов для тестового сигнала и вейвлета Добеши 4 порядка

Точки расщепления (узлы) обозначены слева – направо и снизу – вверх.

Расчёт графиков рис. 2 и 3 производился для введенного сигнала (s) командой-оператором [6]:

$$T = \text{wpdec}(s, 3, 'db4', \text{plot}). \quad (1)$$

Замечание. Команда вывода результатов расчёта (1) определяет формат рисунков, в частности цвет фона. При программном выводе на бумагу рисунок имеет стандартный формат.

Синтез оптимального алгоритма ("дерева") пакетного преобразования. Наилучшее построение "дерева", оптимальное в смысле выбранной функции стоимости, строится с использованием специальных встроенных функций-операторов: $\text{wpsplt}(\cdot)$ и $\text{besttree}(\cdot)$ [7].

В качестве функции стоимости используется энтропия [8], которая имеет несколько отличающихся определений. В данной работе выбрано определение энтропии по Шеннону:

$$E = - \sum_i s_i^2 \log(s_i^2) \quad (2)$$

и через логарифм энергии:

$$E = \sum_i \log(s_i^2). \quad (3)$$

При большой энтропии декомпозиция сигнала "размазана" по базисным функциям, при малой энтропии большая часть нормы сигнала сосредоточена в малом числе базисных функций, и это даёт возможность существенного сжатия информации. Результаты пакетного разложения с функцией стоимости позволяют получить оптимальное "дерево" декомпозиции с числом ветвей "расщепления", меньше, чем на рис. 3. Программное решение задачи оптимизации выполняется встроенными функциями [9]:

$$\text{besttree}(T) \text{ и } \text{bestlevt}(T), \quad (4)$$

где T – "дерево" стандартного пакетного разложения в соответствии с (1).

Задача решается для сигнальной функции, используемой для разрешения парной цели по структуре соответствующей дискретной биквантованной пачки с флюктуациями в центре.

Результат вычисления оптимального "дерева" пакетной вейвлет-декомпозиции данного сигнала представлен на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показано "дерево" пакетной декомпозиции прямоугольной дискретной пачки при стандартном алгоритме (рис. 3). Оно соответствует как нефлюктуирующей (одиночная цель), так и флюктуирующей (парная цель) пачке (на правом рис. 4 показана первая).

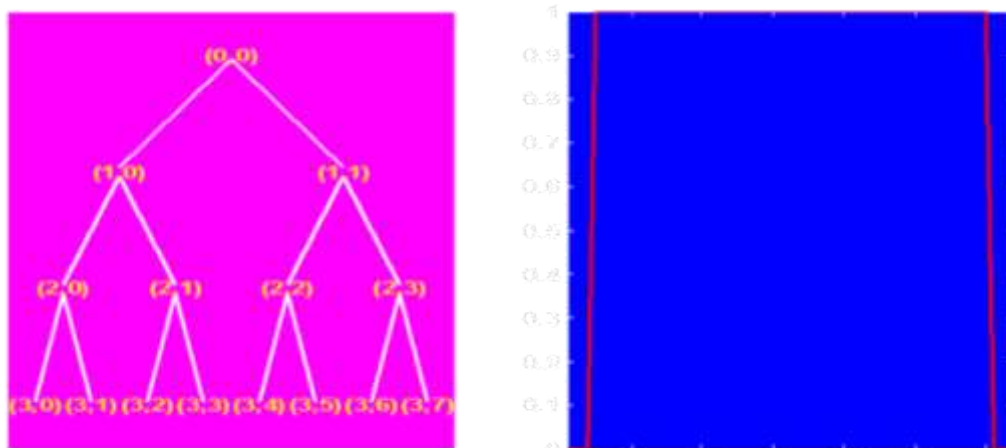


Рис. 4. Вид "дерева" пакетной декомпозиции прямоугольной дискретной пачки при стандартном алгоритме

На рис. 5 показано "дерево" оптимального вейвлет-разложения. В пачке за счёт флюктуаций имеются 2 нулевых отсчёта ($M=64$). В обоих случаях алгоритм ограничен тремя уровнями (для упрощения).

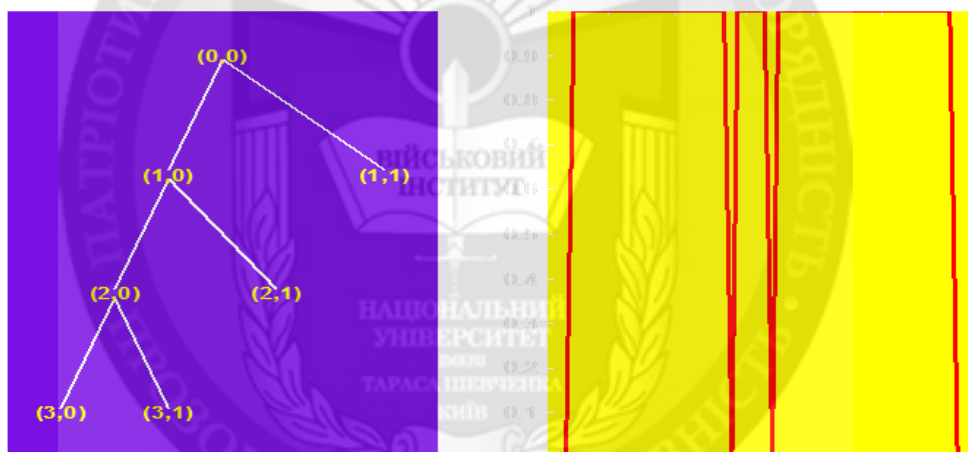


Рис. 5. Вид "дерева" оптимального вейвлет-разложения

Выводы. Сравнительный анализ рис. 4 и 5 показывает, что оптимизация построения алгоритма пакетной декомпозиции сигнала существенно сокращает число операций обработки при обеспечении минимальной энтропии.

Влияние характеристик и параметров предложенного оптимального алгоритма пакетной декомпозиции и сигнала на норму разности сигнальных функций (контрольных), с целью определения требования к виду базисного вейвлета, его порядку, уровню декомпозиции, амплитудно-временным параметрам сигнала и образца, а также допустимой СКВ шума в решении задачи разработки метода распознавания типа принятого сигнала тестового варианта сосредоточенной цели на основании пороговой оценки числового показателя, характеризующего результат вейвлет-декомпозиции эхосигнала, являются предметом дальнейших исследований.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Чуи К. Введение в вейвлеты / К. Чуи.– М.: Мир, 2001. – 412 с.
2. Malla, S. A wavelet tour of signal processing / S. Malla. - San Diego: Academic press, 2005. – 577 с.
3. Бурнаев Е.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа сигналов – М.:МФТИ, 2007. – 138 с.
4. Долгушин В.П., Лоза В.Н., Борзак А.Н., Жиров Б.Г. Распознавание класса целей методом оценки статистических параметров вектора вейвлет-декомпозиции сигнала // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2014. – № 45. – С. 24 – 33.
5. Лоза В.Н., Ленков Е.С. Особенности применения пакетных алгоритмов вейвлет-анализа при обработке сигналов // Збірник наукових праць "Системи обробки інформації", 2016, випуск 7 (144), с. 66 – 71.
6. Смоленцев Н.К. Вейвлет-анализ в MATLAB – М.: ДМК Пресс, 2010. – 448 с.
7. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
8. Лоза В.М. Анализ механизма преобразования сигналов с использованием пакетных алгоритмов вейвлет-анализ / Лоза В.М. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2016. – № 53. – С 35 - 40.
9. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширений MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. - 488 с.

REFERENCES:

1. 1. Chui K. Vvedenie v vejvlety / K. Chui.– M.: Mir, 2001. – 412 s.
2. Malla, S. A wavelet tour of signal processing / S. Malla. - San Diego: Academic press, 2005. – 577 с.
3. Burnaev E.V. Primenenie vejvlet-preobrazovaniya dlja analiza signalov – M.:MFTI, 2007. – 138 s.
4. Dolgushin V.P., Loza V.N., Borzak A.N., Zhirov B.G. Raspoznavanie klassa celej metodom ocenki statisticheskikh parametrov vektora vejvlet-dekompozicii signala // Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka. – K., 2014. – № 45. – S. 24 – 33.
5. Loza V.N., Lenkov E.S. Osobennosti primenenija paketnyh algoritmov vejvlet-analiza pri obrabotke signalov // Zbirnik naukovih prac' "Sistemi obrobki informacii", 2016, vipusk 7 (144), s. 66 – 71.
6. Smolencev N.K. Vejvlet-analiz v MATLAB – M.: DMK Press, 2010. – 448 s.
7. D'jakonov V.P. MATLAB i SIMULINK dlja radioinzhenеров – M.: DMK Press, 2011. – 976 s
8. Loza V.M. Analiz mehanyzma preobrazovanyja sygnalov s yspol'zovanyem paketnyh algoritmov vejvlet-analiz / Loza V.M. // Zbirnyk naukovyih prac' Vijs'kovogo instytutu Kyi'vs'kogo nacional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K., 2016. – № 53. – S 35 - 40.
9. D'jakonov V.P., Kruglov V.V. Matematicheskie pakety rasshirenij MATLAB. Special'nyj spravochnik. – SPb.: Piter, 2001. - 488 s.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Лоза В.М.

ПОБУДОВА АЛГОРИТМУ БАГАТОРІВНЕВОЇ ДИСКРЕТНОЇ ВЕЙВЛЕТ-ФІЛЬТРАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ І СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПОБУДОВИ БАЗИ ФІЛЬТРІВ

Матеріал поданий у статті є продовженням досліджень щодо застосування вейвлет-технології в області обробки ехосигнала в радіолокаційних системах виявлення повітряних об'єктів, а саме вирішення задачі кутового розрізнення парної зосередженої цілі (визначену, як "надрозрізнення") методом порогової обробки результатів вейвлет-декомпозиції сигналів.

У статті обґрунтовано побудову і представлений алгоритм багаторівневої дискретної вейвлет-фільтрації за пірамідальним алгоритмом Малла. Розроблено синтез оптимального алгоритму побудови вейвлет-декомпозиції на основі пакетних вейвлетів.

Ключові слова: радіолокаційний сигнал, вейвлет-аналіз, пакетне вейвлет-перетворення.

Ph.D. Loza V.N.

**CONSTRUCTION OF ALGORITHM MULTI-LEVEL DISCRETE WAVELET -
FILTRATION RADAR SIGNAL AND THE SYNTHESIS OF OPTIMAL ALGORITHM FOR
CONSTRUCTING BASE FILTERS**

The material presented in the article is a continuation of research on the application of wavelet technology in the processing of the echo signal in the radar systems detect air targets, namely, solving the problem of the angular resolution of the pair focused goals by thresholding the results of the wavelet decomposition of signals.

The article substantiates the construction and the algorithm of multi-level discrete wavelet filtering algorithm pyramidal Malla. A synthesis of the optimal algorithm for constructing the wavelet decomposition based on wavelet packet.

Keywords: radar signal, wavelet analysis, wavelet transform batch.