SECTION I. TECHNICAL SCIENCE

Аксаяитов М.Х.¹, Егорова Е.В.², Рыбаков А.Н.²
Современное направление развития вейвлет - анализа

¹АО Концерн «Гранит-Электрон»
(Россия, Санкт-Петербург)

²ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики (ФГУП
ВНИИА) им. Н.Л. Духова
(Россия, Москва)

doi 10.18411/gq-30-11-2019-01
idsp sciencerussia-30-11-2019-01

Аннотация

В настоящей статье приведен краткий обзор современных направлений развития вейвлет - анализа. Актуальность работы рассмотрена в контексте бурного развития вейвлет - анализа и широчайшего круга сфер его применения. Вейвлет - анализ является эффективным методом обработки информации в области кодирования видео и аудио сигналов, архивации данных, анализа сложных особенностей сигналов, объединения и разделения сигналов, создания множественного доступа, скрытой связи, мультиплексоров, совместного кодирования источника и канала связи, выделения сигналов на фоне шумов и т.д. Дальнейшее направление исследований применения вейвлет-анализа в сфере контроля качества передачи информации в выявлении потенциальных возможностей распознавания сигналов в различных условиях сигнально - помеховой обстановки, а также в выборе и обосновании критерия при реализации процедур распознавания.

Ключевые слова: многомасштабный анализ, вейвлет – анализ, анализ Фурье, вейвлет – преобразование, ортогональный вейвлет, биортогональный вейвлет.

Abstract

This article provides a brief overview of the current trends in wavelet analysis. The relevance of the work is considered in the context of the rapid development of wavelet analysis and the widest range of spheres of its application. Wavelet analysis is an effective method of processing information in the field of video and audio signal coding, data archiving, analyzing the complex features of signals, combining and separating signals, creating multiple access, hidden communication, multiplexers, joint source and channel coding, isolating signals against noise etc. A further direction of research is the application of wavelet analysis in the field of quality control of information transmission in identifying potential recognition capabilities of signals in various signal-jamming environments, as well as in selecting and justifying criteria in the implementation of recognition procedures.

Key words: multiscale analysis, wavelet - analysis, Fourier analysis, wavelet - transform, orthogonal wavelet, biorthogonal wavelet.

Вейвлет - анализ разработан для решения задач, оказавшихся слишком сложными для традиционного анализа Фурье. Преобразование Фурье сигнала, заданного во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным функциям (синусам и косинусам) с выделением частотных компонентов [1]. Недостаток преобразования Фурье заключается в том, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени, обуславливая его применимость только к анализу стационарных сигналов, в то время как многие сигналы имеют сложные частотно-временные характеристики. Как правило, такие сигналы состоят из близких

по времени, короткоживущих высокочастотных компонентов и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонентов. Для анализа таких сигналов необходим метод, способный обеспечить хорошее разрешение как по частоте, так и по времени. Первое необходимо для локализации низкочастотных составляющих, второе - для выделения компонентов высокой частоты [2]. Существует два подхода к анализу нестационарных сигналов такого типа. Первый основан на локальном преобразовании Фурье (*short-time Fourier transform*). Следуя по этому пути, нестационарный сигнал сводится к стационарному путем его предварительного разбиения на сегменты (фреймы), статистика которых не меняется со временем. Второй подход заключается в использовании вейвлет - преобразования. Рассмотрим вейвлет-анализ без математической строгости: любой сигнал можно разложить в сумму гармоник (синусоид) разной частоты, но синусоидальные волны бесконечны, и не отслеживают изменения сигнала во времени. Чтобы уловить эти изменения, вместо бесконечных волн можно взять совершенно одинаковые, но разнесенные по времени короткие «всплески». Однако, как оказалось, этого недостаточно, надо добавить еще их всевозможные растянутые и сжатые копии. Вот теперь сигнал можно разложить на сумму таких всплесков разного размера и местоположения. По сути, это и есть вейвлет - анализ.

Коэффициенты разложения, по сути несущие информацию об эволюции сигнала, зависят от выбора изначального всплеска. Для каждой прикладной задачи можно подобрать наиболее приспособленный (именно для нее) всплеск, который и называется вейвлетом. Математическая сторона вейвлет – анализа - вещь довольно тонкая и весьма наглядная. Работающие в приложениях математические методы всегда опираются на чистую математику. Вейвлет - преобразование не только работает быстрее, чем преобразование Фурье, но и его программная реализация несравненно проще.

Основы теории вейвлет - преобразования

В 1910 году А.Хаар опубликовал полную ортонормальную систему базисных функций с локальной областью определения (вейвлеты Хаара). Первое упоминание о вейвлетах появилось в литературе по цифровой обработке и анализу сейсмических сигналов (работы А.Гроссмана и Ж.Морле) [3]. В последнее время возникло научное направление, связанное с вейвлет - анализом и теорией вейвлет - преобразования. Вейвлеты широко применяются для фильтрации и предварительной обработки данных, анализа состояния и прогнозирования ситуации на фондовых рынках, распознавания образов, при обработке и синтезе различных сигналов, например речевых, медицинских, для решения задач сжатия и обработки изображений, при «обучении» нейросетей и во многих других случаях.

Несмотря на то, что теория вейвлет - преобразования уже в основном разработана, точного определения, что же такое «вейвлет» и какие функции можно назвать вейвлетами, не существует. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными, биортогональными. Эти функции могут быть симметричными, асимметричными и несимметричными. Различают вейвлеты с компактной областью определения и не имеющие таковой. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие – быстрый алгоритм вычисления связанного с ними вейвлет - преобразования.

Вейвлеты и многомасштабный анализ

Рассмотрим задачу, которая часто встречается на практике: есть сигнал (а сигналом может быть все, что угодно, от записи показаний датчика и до оцифрованной речи или изображением). Идея многомасштабного анализа (*multiscale analysis*, *multiresolutional analysis*) заключается в том, чтобы взглянуть на сигнал сначала отойти на пару шагов и посмотреть издали, затем через лупу, затем вплотную – под микроскопом (рис.1).

Рис.1. Пример многомасштабного анализа изображения

Во-первых, путем последовательного огрубления (или уточнения) сигнала выявлять его локальные особенности (ударение в речи или характерные детали изображения) и подразделять их по интенсивности. Во-вторых, таким образом, обнаруживается динамика изменения сигнала в зависимости от масштаба. Если резкие скачки (например, аварийное отклонение показаний датчика) во многих случаях видны «невооруженным глазом», то взаимодействия событий на мелких масштабах, перерастающие в крупномасштабные явления (так, мощный транспортный поток состоит из движения многих отдельных автомобилей), увидеть очень сложно. И наоборот, сосредоточившись только на мелких деталях, можно не заметить явлений, происходящих на глобальном уровне.

Идея применения вейвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа (то есть вейвлет - преобразование по своей сути является фрактальным). Такие базисные функции называются вейвлетами (*wavelet*), определенные на пространстве $L_2(\mathbb{R})$ (пространство комплекснозначных функций $f(t)$ на прямой с ограниченной энергией), колеблются вокруг оси абсцисс и быстро сходятся к нулю по мере увеличения абсолютного значения аргумента (рис.2). Данное определение не претендует на полноту и точность, а дает лишь некий «словесный портрет» вейвлета. Таким образом, свертка сигнала с одним из вейвлетов позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этого вейвлета, причем чем больший масштаб имеет вейвлет, тем более широкая область сигнала будет оказывать влияние на результат свертки.

Рис.2. Вейвлет «Сомбреро»

Рис.3. Фазовая плоскость вейвлет - преобразования

Согласно принципу неопределенности, чем лучше функция сконцентрирована во времени, тем больше она распределена в частотной области. При перемасштабировании функции произведение временного и частотного диапазонов остается постоянным и представляет собой площадь ячейки в частотно-временной (фазовой) плоскости. Преимущество вейвлет - преобразования перед, например, преобразованием Габора заключается в том, что покрытие фазовой плоскости осуществляется ячейками одинаковой площади, но разной формы (рис.3), что позволяет хорошо локализовать низкочастотные детали сигнала в частотной области (преобладающие гармоники), а высокочастотные – во временной (резкие скачки, пики и т.п.). Вейвлет - анализ позволяет исследовать поведение фрактальных функций – то есть не имеющих производных ни в одной своей точке.

Ортогональное вейвлет - преобразование

Вейвлет - преобразование содержит огромное количество информации о сигнале, но обладает сильной избыточностью, так как каждая точка фазовой плоскости оказывает влияние на его результат. Для точного восстановления сигнала достаточно знать его вейвлет - преобразование на некоторой довольно редкой решетке в фазовой плоскости (например, только в центре каждой ячейки на рис.3). Следовательно, и вся информация о сигнале содержится в этом довольно небольшом наборе значений. Идея заключается в том, чтобы масштабировать вейвлет в некоторое постоянное (например, 2) число раз, и смещать его во времени на фиксированное расстояние, зависящее от масштаба. При этом все сдвиги одного масштаба должны быть попарно ортогональны – такие вейвлеты называются ортогональными. При таком преобразовании выполняется свертка сигнала с некоторой скейлинг - функцией и с вейвлетом, связанным с этой скейлинг – функцией [4]. В результате получена «сглаженная» версия исходного сигнала и набор «деталей», отличающих сглаженный сигнал от исходного.

Последовательно применяя такое преобразование, можно получить результат нужной степени детальности (гладкости) и набор деталей на разных масштабах. Более того, применив вейвлет - преобразование к заинтересовавшей детали сигнала, можно получить ее «увеличенное изображение». И наоборот, отбросив несущественные детали и выполнив обратное преобразование, получен сигнал, очищенный от шумов и случайных выбросов (например, «убрать» случайно попавшую в кадр птицу на фотографии здания).

Дискретное вейвлет - преобразование

Идея использовать вейвлет - преобразование для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима, например, при их обработке на ЭВМ). Основная трудность заключается в том, что формулы для дискретного вейвлет - преобразования нельзя получить просто дискретизацией соответствующих формул непрерывного преобразования. И.Добеши удалось найти метод, позволяющий построить (бесконечную) серию ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов. Стало возможным построить алгоритм, реализующий быстрое вейвлет - преобразование на дискретных данных (алгоритм Малла). Достоинство этого алгоритма, помимо всего вышесказанного, заключается в его простоте и высокой скорости: и на разложение, и на восстановление требуется порядка cN операций, где c – число коэффициентов, а N – длина выборки.

Выше рассмотрены основные виды вейвлет - анализа. Более полную информацию, в частности, об обратном вейвлет - преобразовании, используемом для восстановления сигнала по вейвлет - коэффициентам, изложена в [1,4], здесь же отразим ключевые моменты, которые необходимо учитывать при использовании вейвлет - анализа для контроля инфокоммуникаций.

1. Поиск оптимального (для конкретной ситуации) компромисса между непрерывным и дискретным представлением. Ортогональный вейвлет - базис можно рассматривать, как словарь «форм», из которых по определенным правилам набирается заданный сигнал. Но этот словарь можно значительно расширить, взяв более густую сетку в фазовой плоскости. Разложение по такому словарю уже не будет однозначным, но его можно лучше подогнать к сигналу, сделать более устойчивым к помехам. Нахождение коэффициентов в принципе здесь относится к задаче оптимизации, но обычно существуют сравнительно быстрые алгоритмы «квазиоптимизации», самый популярный из которых называется «поиск совпадения» (*matching pursuit*). Такая методика, кстати, применима не только к вейвлетным словарям.

2. Использование биортогонального вейвлет - анализа вместо ортогонального вейвлет - анализа. При этом для разложения по алгоритму Малла используется одна пара фильтров, для восстановления - другая. Биортогональные фильтры построить легче, так как они более гибкие (например, их можно сделать симметричными, в

отличие от ортогональных), но, к сожалению, в этом случае возрастает чувствительность к погрешностям при восстановлении.

3. Введение идеи лифтинга (*lifting*), согласно которой фильтры **H** и **G** оказывается всегда можно свести к последовательному применению более коротких фильтров, что ускоряет алгоритм разложения. Если сразу строить их в таком виде, можно достичь лучшей адаптации к сигналу. С этим связана и другая идея, заключающаяся в использовании в разных точках сигнала разных фильтров. Это приводит к отказу от вейвлет - базиса, состоящего из копий одной функции, при сохранении быстрого алгоритма. С помощью этой же идеи строятся вейвлетные фильтры, переводящие целые числа в целые (хотя коэффициенты фильтров могут быть и не целыми). Это достаточно эффективная предобработка для последующего анализа сигнала [3].

4. Использование мультивейвлетов, которые возникают, если коэффициенты фильтров **H** и **G** представляют собой не числа, а матрицы. В этом случае каждое пространство «деталей» вейвлет образа будет порождаться не одним вейвлетом, а несколькими, в связи с чем последние и называются мультивейвлетами. Быстрый алгоритм разложения в этом случае пишется в матричном виде так же, как алгоритм Малла, но при той же гладкости функции, у мультивейвлетов локализация в пространстве становится лучше, чем при одном вейвлете.

Применение вейвлет - преобразования

В заключение уточним некоторые области, где использование вейвлетов может оказаться (или уже является) весьма перспективным.

Обработка экспериментальных данных. Поскольку вейвлеты появились именно как механизм обработки экспериментальных данных, их применение для решения подобных задач представляется весьма привлекательным до сих пор. Вейвлет - преобразование дает наиболее наглядную и информативную картину результатов эксперимента, позволяет очистить исходные данные от шумов и случайных искажений, и даже «на глаз» подметить некоторые особенности данных и направление их дальнейшей обработки и анализа. Кроме того, вейвлеты хорошо подходят для анализа нестационарных сигналов, возникающих в медицине, анализе фондовых рынков и других областях.

Сжатие данных. Особенностью ортогонального многомасштабного анализа является то, что для достаточно гладких данных полученные в результате преобразования детали в основном близки по величине к нулю и, следовательно, очень хорошо сжимаются обычными статистическими методами. Огромным достоинством вейвлет - преобразования является то, что оно не вносит дополнительной избыточности в исходные данные, и сигнал может быть полностью восстановлен с использованием тех же самых фильтров. Кроме того, отделение в результате преобразования деталей от основного сигнала позволяет очень просто реализовать сжатие с потерями – достаточно просто отбросить детали на тех масштабах, где они незначительны. Достаточно сказать, что изображение, обработанное вейвлетами, можно сжать в 3-10 раз без существенных потерь информации (а с допустимыми потерями – до 300 раз). В качестве примера отметим, что вейвлет - преобразование положено в основу стандарта сжатия данных MPEG4 [5].

Обработка изображений. Человеческое зрение устроено так, что мы сосредотачиваем свое внимание на существенных деталях изображения, отсекая ненужное. Используя вейвлет - преобразование, можно сгладить или выделить некоторые детали изображения, увеличить или уменьшить его, выделить важные детали и даже повысить его качество [2].

Системы передачи данных и цифровой обработки сигналов. Благодаря высокой эффективности алгоритмов и устойчивости к воздействию помех, вейвлет - преобразование является мощным инструментом в тех областях, где традиционно

использовались другие методы анализа данных, например, преобразование Фурье. Возможность применения уже существующих методов обработки результатов преобразования, а также характерные особенности поведения вейвлет - преобразования в частотно-временной области позволяют существенно расширить и дополнить возможности подобных систем.

Нейросети и другие механизмы анализа данных. Большие трудности при «обучении» нейросетей (или настройке других механизмов анализа данных) создает сильная зашумленность данных или наличие большого числа «особых случаев» (случайные выбросы, пропуски, нелинейные искажения и т.п.) [3]. Такие помехи способны скрывать характерные особенности данных или выдавать себя за них и могут сильно ухудшить результаты обучения. Поэтому рекомендуется очистить данные, прежде чем анализировать их. По уже приведенным выше соображениям, а также благодаря наличию быстрых и эффективных алгоритмов реализации, вейвлеты представляются весьма удобным и перспективным механизмом очистки и предварительной обработки данных для использования их в статистических и бизнес-приложениях, системах искусственного интеллекта и т.п.

Заключение

Несмотря на то, что математический аппарат вейвлет - анализа хорошо разработан и теория, в общем, оформилась, вейвлеты оставляют обширное поле для исследований. Достаточно сказать, что выбор вейвлета, наиболее подходящего для анализа конкретных данных, представляет собой скорее искусство, чем рутинную процедуру. Кроме того, огромное значение имеет задача разработки приложений, использующих вейвлет - анализ – как в перечисленных областях, так и во многих других, перечислить которые просто не представляется возможным.

1. Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan. Fundamentals of Wavelets: theory, algorithms, and applications. A Wiley-Interscience Publication. 1999. P. 306.
2. Аксютин М.Х., Мартынов Н.В., Егорова Е.В., Рыбаков А.Н. Аналитические модели непрерывных изображений. Нелинейный мир. №3. Т.15. 2017. С.65-68.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам, перевод. - Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". 2001. С.464.
4. Астафьева Н.М. "Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения", Успехи Физических Наук. 166 (11). 1996. С.1145.
5. Аксютин М.Х., Егорова Е.В., Мартынов Н.В., Рыбаков А.Н. Обнаружение малоконтрастных целей. Успехи современной радиоэлектроники №1. 2017. С.23-26.

Гулиева Н.Г., Скачков Д.А.

Мясной продукт функционального назначения

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
(Россия, Волгоград)*

doi 10.18411/gq-30-11-2019-02

idsp sciencerussia-30-11-2019-02

Аннотация

Исследование посвящено разработке и внедрению на потребительский рынок Российской Федерации мясного продукта в виде готового к употреблению замороженного полуфабриката в тесте. В качестве основы для создания функционального мясного продукта взят национальный азербайджанский мясной продукт «Кутаб». Разрабатываемый полуфабрикат обладает лечебно-профилактическими свойствами в направлении заболеваний, связанных с нарушениями в опорно-двигательном аппарате человека, а в частности с восстановлением хрящевой ткани. В работе приводится традиционная рецептура данного продукта и дается его краткая характеристика. Отмечена пищевая ценность полуфабриката традиционной рецептуры.