

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

### **Введение**

Формирование виртуальных изображений представляет практический интерес при обработке нестационарных радиолокационных сигналов со сложными амплитудно-частотно-временными вариациями, характерных для радиолокационных отражений от различных нестационарных атмосферных образований типа «ангел-объектов».

Виртуальное изображение (от лат. *virtus* – потенциальное, возможное) — создаваемое техническими средствами изображение информации об исследуемом объекте, явлении, процессе. Синонимы: искусственное изображение, электронное изображение, компьютерная модель изображения. Виртуальные изображения конструируют новый искусственный мир или дополнительно вносят отдельные искусственные элементы в восприятие мира реального. Виртуальное изображение (ВИ) – расширяет информационные возможности человека и открывает дорогу для матричного (параллельного) мышления.

Объекты виртуального изображения должны вести себя аналогично объектам материальной реальности. Пользователь может иметь возможность воздействовать на объекты виртуального изображения. В виртуальных мирах создаются изображения физики, подобные реальной (гравитации, свойств воды, столкновения с предметами, электромагнитного взаимодействия с различными объектами, в том числе радиолокации воздушных объектов) [2].

В последние годы при обработке сигналов широко используется новый математический базис представления сигналов с помощью "коротких волночек" – вейвлетов. С его помощью могут обрабатываться нестационарные сигналы, сигналы с разрывами и иными особенностями и сигналы в виде пачек. Вейвлет-преобразование может быть успешно использована в радиотехнике, в том числе и в радиолокации. Благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов (то есть таких, чьи статистические характеристики изменяются во времени) оно может стать мощной альтернативой преобразованию Фурье в ряде радиотехнических приложений. Так как многие радиотехнические (радиолокационные) сигналы нестационарны, вейвлетные методы могут использоваться для создания виртуальных радиолокационных изображений и распознавания и обнаружения по ним ключевых сигнальных признаков.

Классическое преобразование Фурье представляет сигнал, заданный во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным функциям (синусам и косинусам), выделяя таким образом частотные компоненты. Недостаток преобразования Фурье заключается в том, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени. Это и обуславливает его применимость только к анализу стационарных сигналов. Большинство радиолокационных сигналов нестационарное и имеет сложные частотно-временные характеристики. Как правило, такие сигналы состоят из близких по времени, короткоживущих высокочастотных компонентов и долговременных, близких по частоте низкочастотных компонентов [1, 4].

Для анализа таких сигналов нужен метод, способный обеспечить хорошее разрешение и по частоте, и по времени. Первое требуется для локализации низкочастотных составляющих, второе – для разрешения компонентов высокой частоты. Есть два подхода к анализу нестационарных сигналов такого типа. Первый – локальное преобразование Фурье (*short-time Fourier transform*). Следуя по этому пути, мы работаем с нестационарным сигналом, как со стационарным, разбив его предварительно на сегменты (фреймы), статистика которых не меняется со временем. Второй подход – вейвлет-преобразование. В этом случае нестационарный сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из неко-

того прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция-прототип называется анализирующим, или материнским, вейвлетом (mother-wavelet), выбранным для исследования данного сигнала.

### **Формирование радиолокационных виртуальных изображений с помощью вейвлетов**

Актуальное приложение вейвлет-анализа в радиотехнике – это возможность накопления вариаций нестационарных сигналов и формирования их виртуальных изображений. Такая операция может быть достигнута путем накопления данных о вариации нестационарного сигнала за определенный промежуток времени, разложения их по функциональному базису и последующего формирования виртуального изображения. Природа сигналов и механизм человеческого мозга подсказывают использование базисов из функций, хорошо приближающих нестационарные сигналы, а также локализованных по времени и по частоте [2, 3]. Могут быть использованы как одномерное, так и двумерное вейвлет-преобразование. Недавние исследования по вейвлетному формированию радиолокационных изображений во временно-частотных областях показывают, что эта методика позволяет сохранить значимые и получить дополнительные признаки.

Классическим методом получения радиолокационного изображения в частотной области является преобразование Фурье. Результат преобразования Фурье – амплитудно-частотное спектральное изображение, по которому можно определить присутствие некоторой частоты в исследуемом сигнале [5]. В случае, когда не встает вопрос о локализации временного положения частот, метод Фурье дает хорошие результаты. Но при необходимости определить временной интервал присутствия частоты приходится применять другие методы.

Одним из таких методов является обобщенный метод Фурье (локальное преобразование Фурье). Этот метод состоит из следующих этапов:

1. В исследуемой функции создается скользящее окно (СО) – временной интервал, для которого функция  $f(x)$  имеет собственное значение, а за пределами интервала  $f(x)=0$ .
2. Для этого СО вычисляется преобразование Фурье.
3. СО сдвигается, и для него также вычисляется преобразование Фурье. При прохождении таким СО вдоль всего сигнала получается некоторая трехмерная функция, зависящая от положения СО и частоты.

Данный подход позволяет определить факт присутствия в изображении любой частоты, и интервал ее присутствия. Это значительно расширяет возможности метода по сравнению с классическим преобразованием Фурье, но существуют и определенные недостатки. Согласно следствиям принципа неопределенности Гейзенберга в данном случае нельзя утверждать факт наличия частоты  $w_0$  в сигнале в момент времени  $t_0$  – можно лишь определить, что спектр частот  $(w_1, w_2)$  присутствует в интервале  $(t_1, t_2)$ . Причем разрешение по частоте (по времени) остается постоянным вне зависимости от области частот (времен), в которых производится исследование. Поэтому, если, например, в сигнале существенна только высокочастотная составляющая, то увеличить разрешение можно только изменив параметры метода. В качестве метода, не обладающего подобного рода недостатками, был предложен аппарат вейвлет-преобразования. [3, 4].

Различают дискретный и непрерывный вейвлет-анализ, аппарат которых можно применять как для непрерывных, так и для дискретных сигналов. Сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция-прототип называется анализирующим (материнским) вейвлетом.

Вейвлет-функция должна удовлетворять двум условиям:

1. Среднее значение (интеграл по всей прямой) равно 0.
2. Функция быстро убывает при  $t \rightarrow \infty$ .

Обычно, функция-вейвлет обозначается буквой  $\psi$ . В общем случае вейвлет-преобразование функции  $f(t)$  выглядит так

$$W(x,s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left( \frac{t-x}{s} \right) f(t) dt, \quad (1)$$

где  $t$  – ось времени,  $x$  – момент времени,  $s$  – параметр, обратный частоте, а  $(*)$  – означает комплексно-сопряженное.

Главным элементом в вейвлет-анализе является функция – вейвлет. Вейвлетом является любая функция, отвечающая двум указанным выше условиям. Наибольшей популярностью пользуются два типа вейвлета: Вейвлет "сомbrero" (Mexican Hat), названный так благодаря своему внешнему виду и вейвлет Морле.

На рис.1 изображен вид примененного в работе вейвлета Морле. График любого вейвлета выглядит примерно также, как и примененный вейвлет Морле. Заметим, что вейвлет Морле – комплекснозначный, на рисунке изображена его вещественная составляющая.

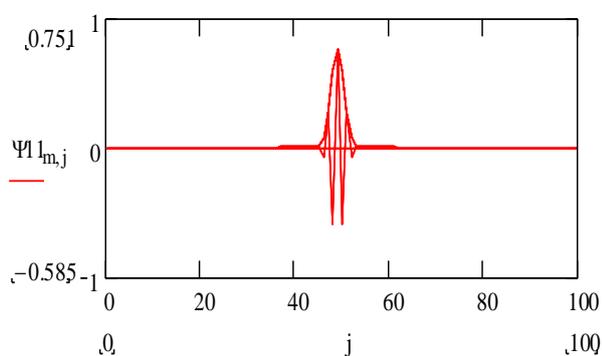


Рис. 1

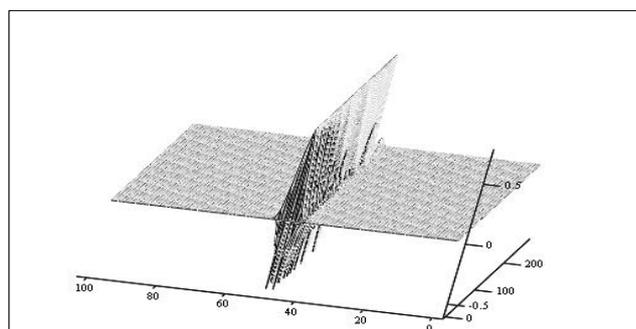


Рис. 2

Итак, у нас имеется некоторая функция  $f(t)$ , зависящая от времени. Результатом ее вейвлет-анализа будет некоторая функция  $W(x,s)$ , которая зависит уже от двух переменных: от времени и от частоты (обратно пропорционально). Для каждой пары  $x$  и  $s$  рецепт вычисления вейвлет-преобразования следующий:

1. Функция вейвлет растягивается в  $s$  раз по горизонтали и в  $1/s$  раз по вертикали.
2. Далее он сдвигается в точку  $x$ . Полученный вейвлет обозначается  $\psi(x,s)$ .
3. Производится усреднение в окрестности точки  $s$  при помощи  $\psi(x,s)$ .

На рис. 2 изображена функция вейвлет Морле  $\Psi_{11}(\psi(x,s))$ , имеющая вид при применении для получения виртуального изображения радиолокационного сигнала  $f(t)$  путем растяжения в  $s$  раз по частоте и сжатия в  $1/s$  раз по амплитуде.

В результате получается наглядная трехмерная картина или виртуальное изображение, иллюстрирующее частотно-временные характеристики сигнала. На вертикальной оси откладывается амплитудное значение вейвлет-преобразования, а по горизонтальным осям ординат – частота (иногда размерность оси ординат выбирается так:  $\log(1/s)$ , где  $s$  – частота) и время.

Приведем конкретный пример формирования двумерного виртуального изображения нестационарного радиолокационного сигнала со сложными амплитудно-частотно-временными вариациями, характерными для радиолокационных отражений типа «ангел-эхо».

На рис. 3 показано ВИ нестационарного радиолокационного сигнала типа «ангел-эхо», полученного на обзорной РЛС 10-сантиметрового диапазона при остановленной антенне (длительность импульса 1 мкс, частота зондирования 365 Гц). По горизонтальной оси отложено время в количестве зондирований РЛС, а по вертикальной оси – дискретная амплитуда (8 разрядный АЦП).

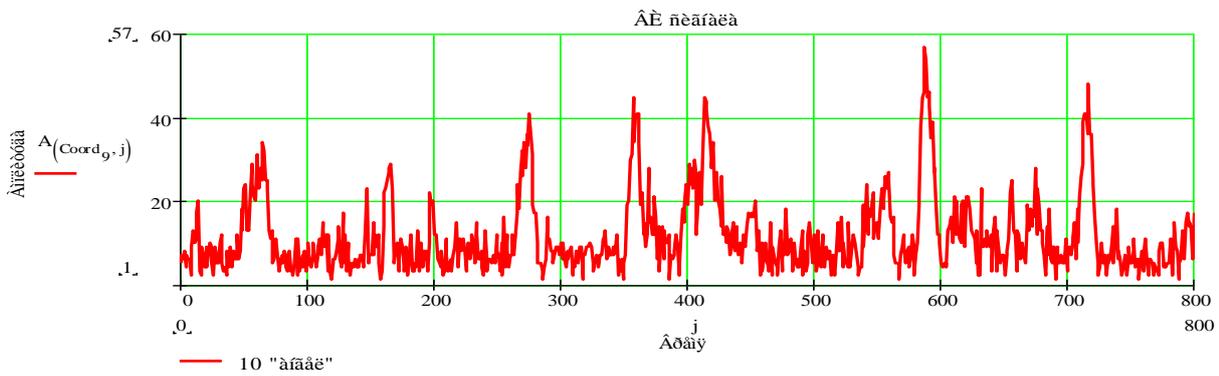
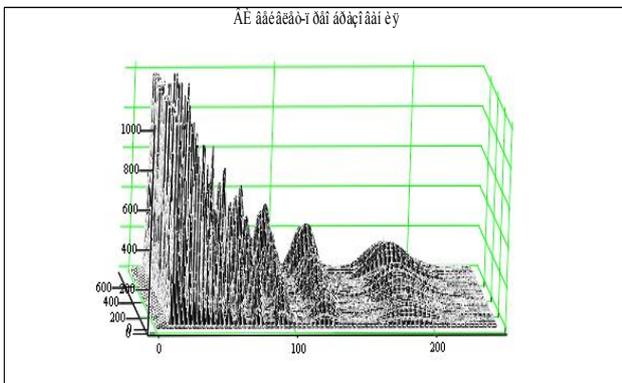
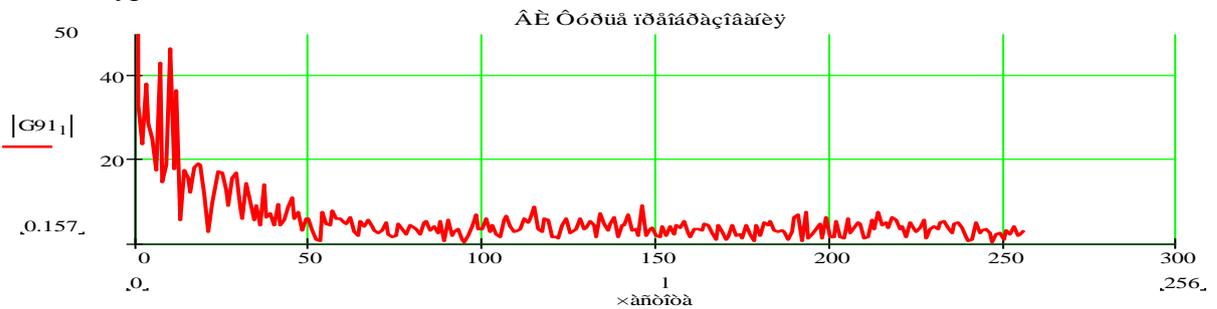


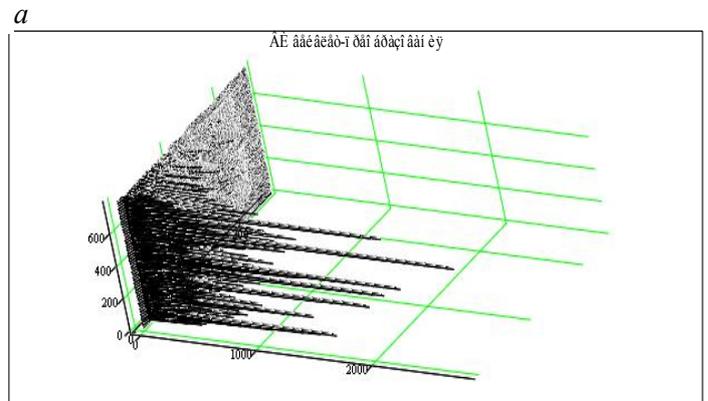
Рис. 3

Ниже для сравнения показаны виртуальные изображения, полученные путем Фурье и вейвлет-преобразования нестационарного радиолокационного сигнала типа «ангел-эх», представляющего из себя наложение сигналов различной частоты, изменяющихся во времени [1, 4]. Частотные характеристики данного радиолокационного сигнала изменяются во времени (сигнал нестационарный), что хорошо видно из анализа рис. 3.

На рис. 4, а приведены виртуальные изображения поведения сигнала во временной области, на рис. 4, б – картины изменения частотных характеристик (спектра) во времени. Исходный сигнал изображен на рис. 3. По рис. 4 удобно сравнить результаты, которые дают преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Как видно из рис. 4, а преобразование Фурье дает информацию о том спектре частот, который присутствует в сигнале в промежутке времени анализа, при этом нам неизвестно когда именно та или иная частота реально присутствовала в сигнале. В то же время вейвлет-преобразование (рис. 4, б) дает исчерпывающую картину динамики изменения частотных характеристик во времени. Все это указывает на то, что вейвлет-преобразование существенно более информативно по сравнению с преобразованием Фурье.



М



М

б

Рис. 4

Как видно из рис. 4, *а* преобразование Фурье дает информацию о том спектре частот, который присутствует в сигнале в промежутке времени анализа, при этом нам неизвестно когда именно та или иная частота реально присутствовала в сигнале. В то же время вейвлет-преобразование (рис. 4, *б*) дает исчерпывающую картину динамики изменения частотных характеристик во времени. Все это указывает на то, что вейвлет-преобразование существенно более информативно по сравнению с преобразованием Фурье.

Таким образом, по полученным ВИ поведения спектров радиотехнических (радиолокационных) нестационарных сигналов легко выделить ключевые сигнальные признаки для мешающих отражений типа «ангел-эхо», а затем осуществить операции распознавания и обнаружения воздушных объектов на фоне их.

### **Заключение**

1. В работе приведены результаты анализа возможности применения классических и обобщенных методов преобразования радиолокационных сигналов для получения радиолокационного изображения в частотной области с возможностью визуализации изменений спектра частот нестационарного сигнала типа «ангел-эхо». Анализ показал, что существующие методы не дают информацию о локализации временного положения спектра частот.

2. В качестве метода, не обладающего подобного рода недостатками, предлагается использовать аппарат вейвлет-преобразования. При этом сигнал предлагается анализировать путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа предполагаемого сигнала путем сжатий, растяжений и сдвигов. Функция-прототипа назван анализирующим вейвлетом.

3. По полученным виртуальным изображениям поведения спектров радиолокационных нестационарных сигналов легко выделить ключевые признаки для сигналов типа «ангел-эхо», а затем осуществить операции распознавания и обнаружения воздушных объектов на фоне их.

**Список литературы:** 1. *Жирнов, В.В., Стрельченко, В.И., Сахновская, Л.З.* Экспериментальные исследования радиолокационных отражений от локальных неоднородностей атмосферы // Радиотехника. – 2002. – Вып. 129. – С.46-50. 2. *Дьяконов, В. П.* Вейвлеты. От теории к практике. Изд.е 2-е доп. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 400 с . 3. *Афонский, А. А., Дьяконов, В. П.* Цифровые анализаторы спектра, сигналы и логики ; под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М. : СОЛОН-Пресс, 2009 – 248 с. 4. *Жирнов, В.В., Солонская, С.В.* Распознавание радиолокационных отметок по спектральному изображению с адаптивными весовыми коэффициентами // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – Вып. 1. – С. 121-124. 5. *Теоретические основы радиолокации ; под ред. Я.Д. Ширмана.* – М. : Сов. радио, 1970. – 560с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 05.11.2013*