

DOI 10.37882/2223–2966.2021.07.41

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ WAVE-ВЕЙВЛЕТА

DIGITAL SIGNAL PROCESSING
WITH WAVE-WAVELET**A. Shchukin**
A. Pavlov

Summary. When a radar system receives a signal from a long distance, it may be difficult to determine the number and angular location of the observed targets. The article presents a method of solving this problem using wavelet transform.

Keywords: wavelet transform, computer modeling, super-resolution, target search.

Щукин Андрей Алексеевич

Аспирант, ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский
технологический университет»
56732168@mail.ru

Павлов Александр Евгеньевич

Аспирант, ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский
технологический университет»
epifan.captain@mail.ru

Аннотация. При получении сигнала радарной системой с большого расстояния могут возникнуть затруднения в определении количества и углового расположения наблюдаемых целей. В статье представлен метод решения данной проблемы с помощью вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, компьютерное моделирование, сверхразрешение, поиск целей.

Введение

Разрешающая способность относится к важнейшим тактическим показателям радиолокационной системы (РЛС). Она характеризует возможности РЛС по раздельному радиолокационному наблюдению целей с близкими параметрами.

Разрешающая способность определяет способность оптической системы изображать раздельно два близко расположенных точечных предмета. Угловая разрешающая способность — это минимальное угловое расстояние между двумя точками, при котором их изображение отличимо от изображения одной точки.

Согласно критерию Рэля, изображения двух близлежащих одинаковых точечных источников или двух близлежащих спектральных линий с равными интенсивностями и одинаковыми симметричными контурами разрешимы (разделены для восприятия), если центральный максимум дифракционной картины от одного источника совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого.

При выполнении критерия Рэля интенсивность «провала» между максимумами составляет приблизительно 80% интенсивности в максимуме, что является

достаточным для разрешения. Если критерий Рэля нарушен, то они сливаются [1].

Разрешение по Рэлю показано на рисунке 1. Сплошной линией показаны два исходных сигнала, пунктиром — их сумма.

В статье представлен метод цифровой обработки сигналов, с помощью которого возможно раздельное распознавание целей, неразрешимых по критерию Рэля.

Методы,
используемые в исследовании

Необходимо задать цель так, как она условно выглядит в «действительности», у которой алгоритм будет определять угловое разрешение. Для этого задается синусоидальная функция (1),

$$I(a) := \text{if}(|a| < 0.2, 100 \cdot \sin(19.5 \cdot a)^{80}, 0) \quad (1)$$

где a — угол в радианах [2]. На всех последующих рисунках и графиках по оси абсцисс указан угол в радианах, по оси ординат — амплитуда в децибелах. На рисунке 2 показано графическое отображение заданных целей.

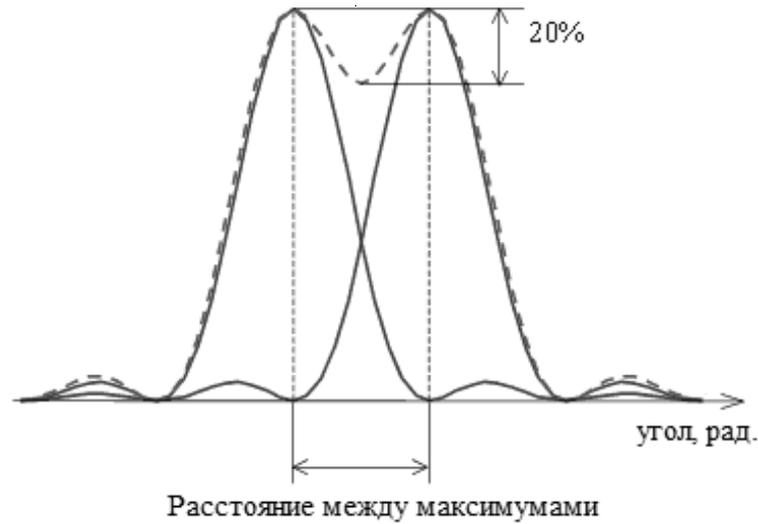


Рис. 1. Разрешение по Рэлею

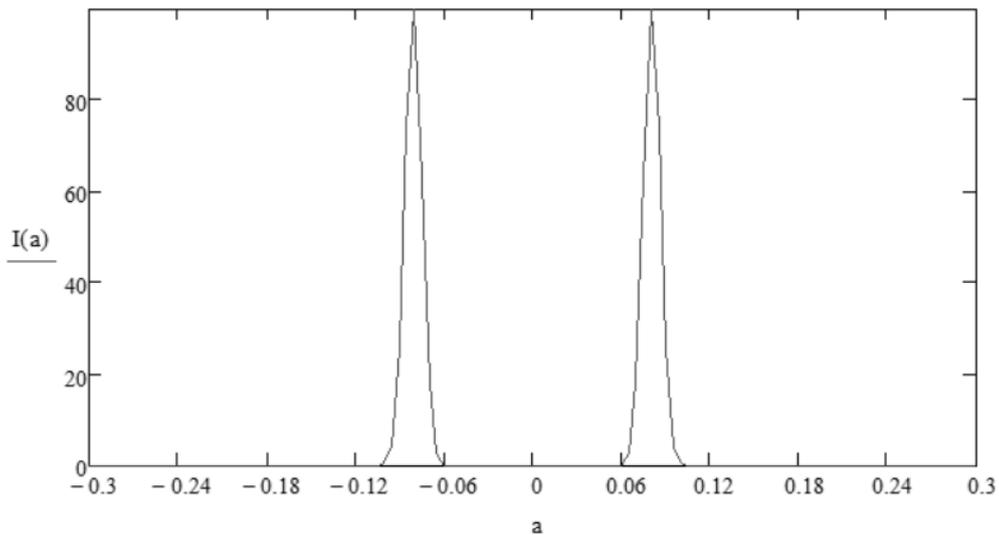


Рис. 2. Графическое отображение заданных целей

Далее моделируется, в каком виде радар получит отображение этих целей. Для этого используется линейное интегральное уравнение Фредгольма первого рода типа свертки. В качестве ядра уравнения используется функция (2),

$$f(a-x) := \sum_{n=0}^{2M} \exp[-i \cdot 2\pi \cdot d \cdot (n-M) \cdot (\sin(a) - \sin(x))] \quad (2)$$

где $f(a)$ — диаграмма направленности системы измерения, сфокусированная в направлении x .

Функция (2) является упрощенной математической моделью угломерной системы, представляющей собой антенную решетку, состоящую из $2M+1$ элементов с расстоянием d между соседними излучателями.

В качестве оператора для линейного интегрального уравнения Фредгольма использована функция (1), с помощью которой задается реальное расположение целей. Получившееся линейное интегральное уравнение Фредгольма имеет вид (3) [3, 4, 5].

$$u(a) := \int_{-0.18}^{0.18} f(a-x) \cdot I(x) dx \quad (3)$$

Графическое отображение углового расположения целей, полученное радаром, изображено на рисунке 3. Так же стоит отметить, что максимальное значение полученного сигнала составляет ~ 16.7 , а в локальном минимуме, расположенном между целями, ~ 14.5 , что

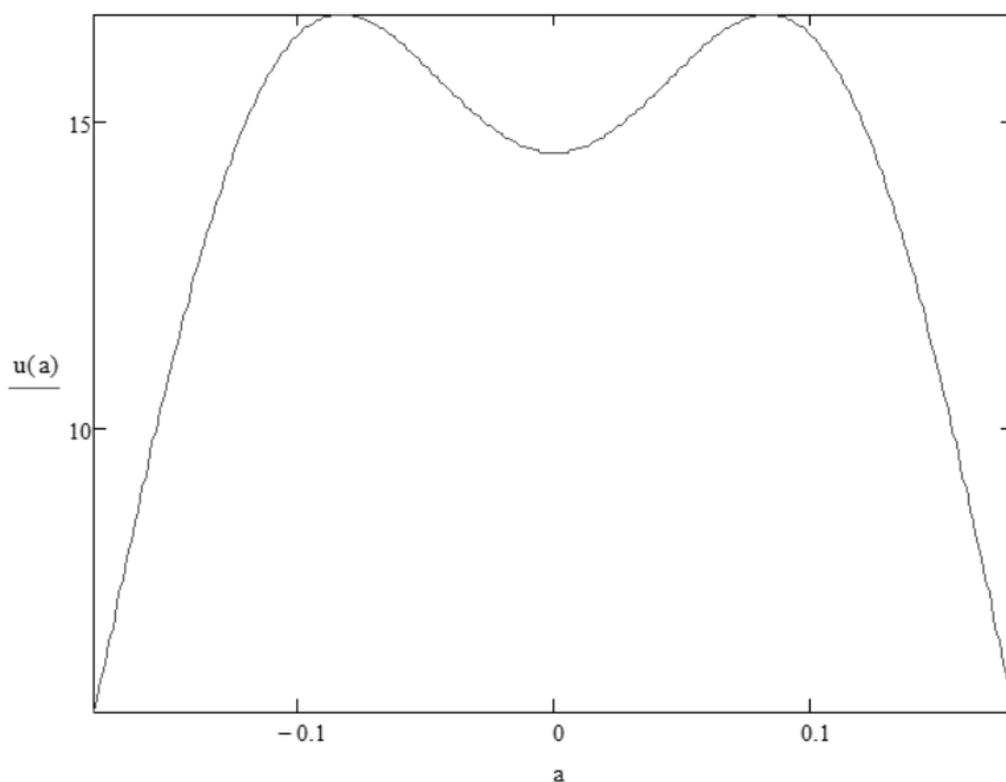


Рис. 3. Графическое отображение углового расположения целей, полученное радаром

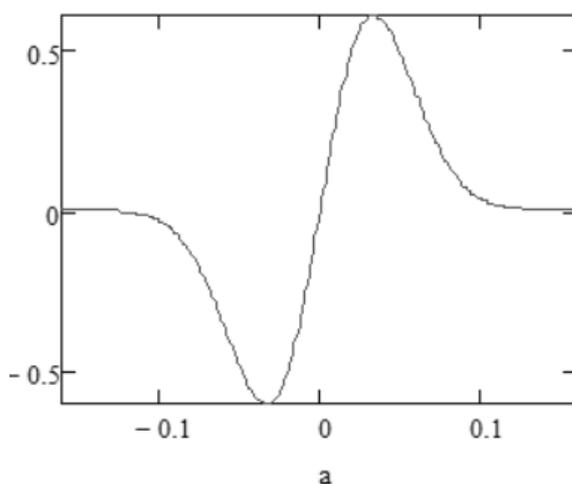


Рис. 4. Wave-вейвлет

составляет ~86%, из чего можно сделать вывод, что полученный сигнал не разрешается по критерию Рэля, а значит, полученная модель годится для оценки работоспособности алгоритма.

Данная задача решается путём параметризации — вместо неизвестных нам целей $I(x)$ в формулу (3) подставляется некая система функций вида

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot f_i(x),$$

где a_i — неизвестные коэффициенты, $f_i(x)$ — функции, задаваемые пользователем. Далее решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) — подбираются такие коэффициенты a_i , чтобы полученная

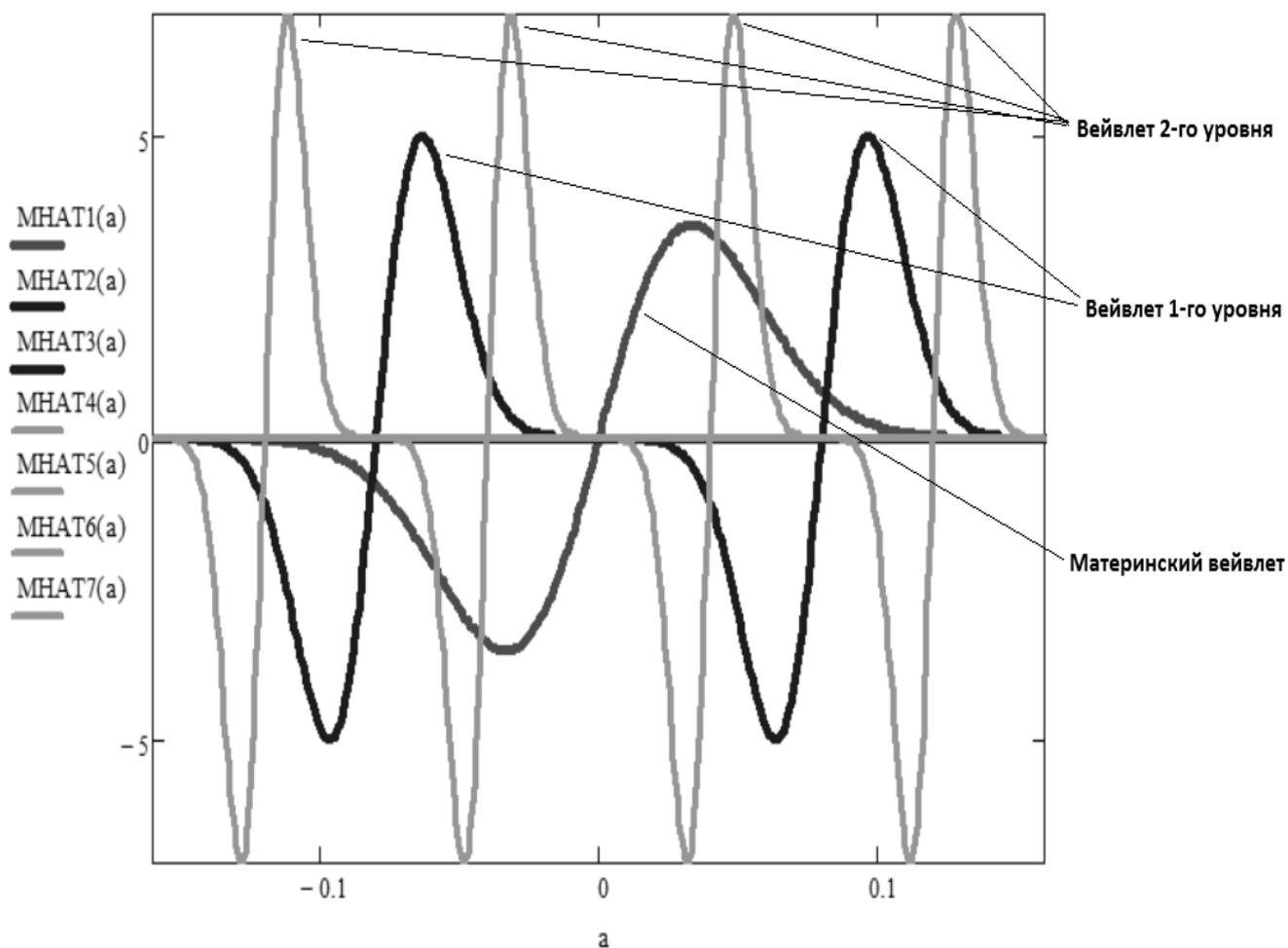


Рис. 5. Система wave-вейвлетов

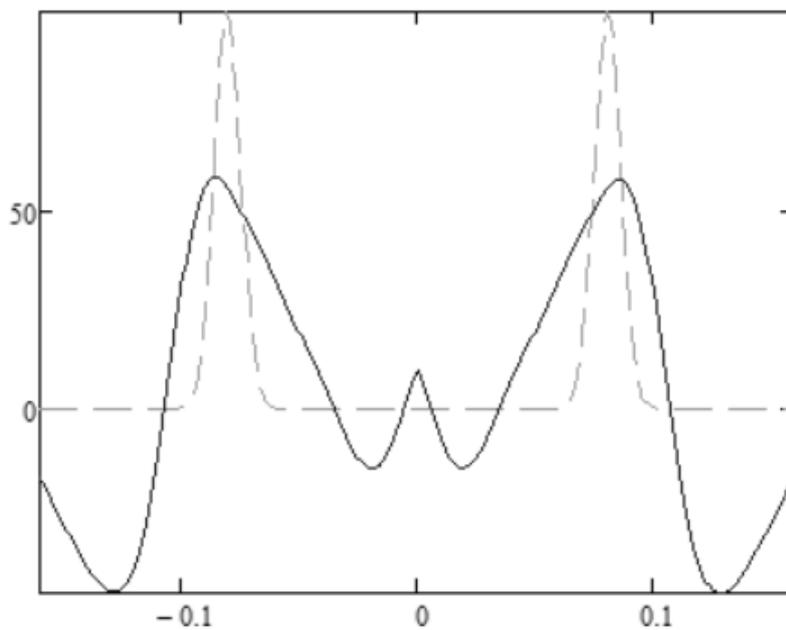


Рис. 6. Решение для системы wave-вейвлетов с использованием вейвлетов 1-го уровня

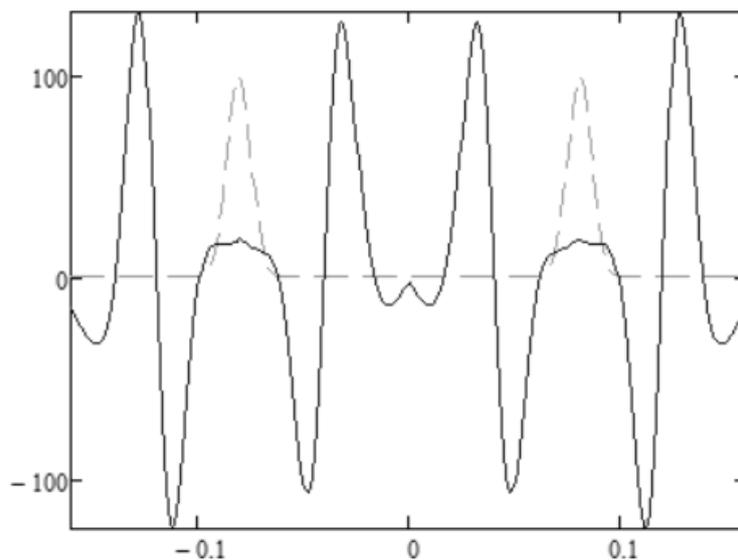


Рис. 7. Решение для системы wave-вейвлетов с использованием вейвлетов 1-го и 2-го уровня

функция была максимально приближена к исходной функции (3).

Для проверки работоспособности алгоритма и поиска исходных целей используется система wave-вейвлетов (4).

$$WHAT(a) := (W \cdot a) \cdot \exp\left(\frac{-W^2 \cdot a^2}{2}\right) \quad (4)$$

Wave-вейвлет изображен на рисунке 4.

Чтобы к данным, полученным радаром, можно было применить вейвлет-преобразование, необходимо нормировать материнский вейвлет (5).

$$INTF := \sqrt{\int_{-0.16}^{0.16} (WHAT(a))^2 da}$$

$$NF(a) := \frac{WHAT(a)}{INTF} \quad (5)$$

На основе нормированного материнского вейвлета строится система дочерних вейвлетов. Для этого к функции материнского вейвлета подставляются различные коэффициенты, для изменения графика до нужных параметров. В данном случае дочерние вейвлеты каждого следующего уровня в два раза уже и в $\sqrt{2}$ выше вейвлетов предыдущего уровня.

Таким образом построены три уровня Wave-вейвлетов.

На рисунке 5 изображена система Wave-вейвлетов.

Решение для системы wave-вейвлетов с использованием вейвлетов 1-го уровня, полученное в результате численного эксперимента, изображено на рисунке 6. Пунктирной линией обозначено истинное расположение целей, сплошной линией — найденное решение. В результате расчётов цели определены верно, амплитуда близка к «реальной», угловое разрешение почти не отличается от «реального».

Решение для системы wave-вейвлетов с использованием вейвлетов 1-го и 2-го уровня изображено на рисунке 7. Цели обнаружены неверно, вместо двух целей алгоритм показывает четыре, найденная амплитуда сильно превышает «реальную».

Заключение

Из проведенного численного эксперимента можно сделать вывод, что представленный алгоритм в некоторых случаях пригоден для получения сверхразрешения и преодоления критерия Рэля. Было выявлено, что из рассмотренных методов, наилучшим образом себя показал алгоритм обработки с использованием системы из трёх wave-вейвлетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И., Курс физики. — Издание седьмое, стереотипное. — М.: Высшая школа, 2003. — 541 с.
2. Лаговский Б.А., Чердынцев В.В., Прикладное программное обеспечение, Москва, МИРЭА, 2010. — 20 с.

3. Лаговский Б.А., Самохин А.Б. — Устойчивость алгебраических методов восстановления изображений источников с повышенным угловым разрешением. // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2011, № 4, т. 16, с. 6–12.
4. Лаговский Б.А., Самохин А.Б., Самохина А.С. — Формирование изображений радиолокационных целей со сверхразрешением алгебраическими методами. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2014, № 8, с. 23–27.
5. Лаговский Б.А., Чикина А.Г. Регрессионные методы получения сверхразрешения для групповой цели. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2020, № 1, с. 69–76.

© Шукин Андрей Алексеевич (56732168@mail.ru), Павлов Александр Евгеньевич (epifan.captain@mail.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



МИРЭА — Российский технологический университет