

Применение вейвлет-фильтрации при ведении радиотехнического мониторинга

В. В. Уткин, В. А. Коротков, Д. С. Войнов

На основе результатов имитационного моделирования в статье приведен сравнительный анализ качества вейвлет-фильтрации частотно-временных портретов радиосигналов за счет фильтрации шумовой составляющей.

Ключевые слова: радиотехнический мониторинг, скрытые сигналы, вейвлет-фильтрация.

1. Введение

При ведении радиотехнического мониторинга в сложной сигнально-помеховой обстановке, а также в условиях широкого применения энергетически скрытых сигналов возникает необходимость повышения качества частотно-временных портретов распознаваемых сигналов [1–3].

Под частотно-временным портретом предлагается понимать графическое представление результатов частотно-временного преобразования радиосигнала в интересах его технического анализа. Качество частотно-временного портрета – это совокупность его свойств, оказывающих существенное влияние на визуальный технический анализ.

2. Имитационная модель и результаты моделирования

Одним из возможных подходов к улучшению качества частотно-временного портрета радиосигнала (в общем случае – аддитивной смеси сигнала и шума) является применение вейвлет-фильтрации. Так, в работе [5] рассмотрен подход, позволяющий улучшить качество частотно-временных портретов распознаваемых сигналов за счет использования вейвлет-функции Морле. В то время как, например, в пакете WAVELET TOOLBOX системы Matlab R2016a реализовано пятнадцать базовых типов вейвлетов [6].

В соответствии с этим определен научный и практический интерес представляет оценивание возможностей базовых типов вейвлетов по повышению качества частотно-временных портретов распознаваемых сигналов за счет фильтрации шумовой составляющей. С этой целью в системе Matlab R2016a была разработана имитационная модель, структурная схема которой представлена на рис. 1.

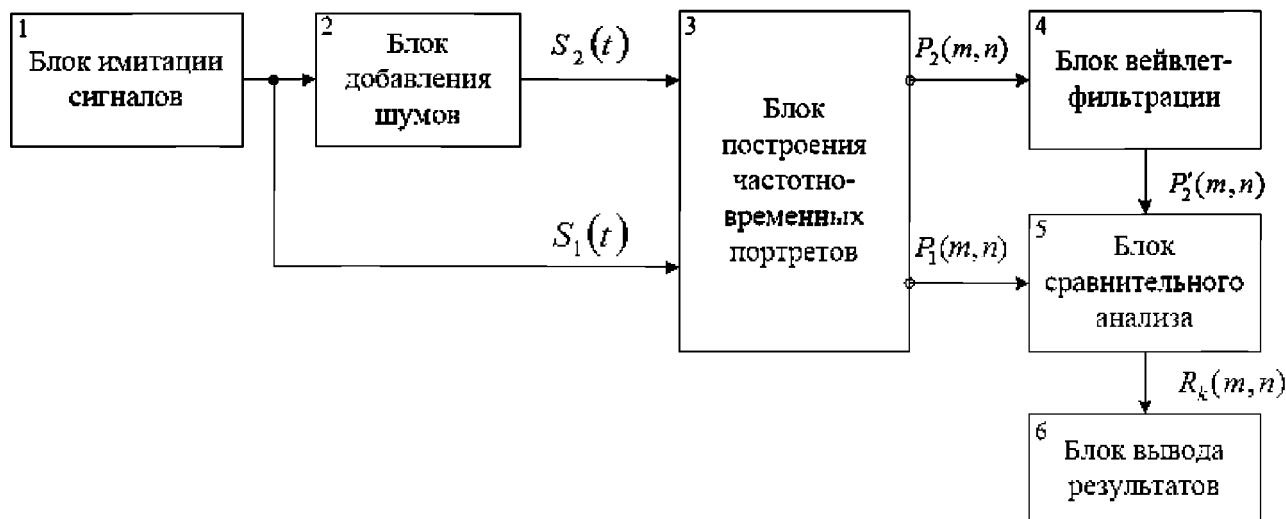


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

В блоке 1 моделируется эталонный радиолокационный сигнал, который может представлять собой классическую импульсную последовательность или сигнал, характерный для скрытых радиолокационных станций (фазоманипулированный по кодам Фрэнка, P1, P2, P3, P4, многочастотный по коду Костаса или другие) [3, 7]. В данной статье в качестве эталонного был выбран квазинепрерывный многочастотный сигнал, полученный на основе неравномерного частотного распределения с применением массива Костаса, аналитическое представление которого имеет вид [8]:

$$S(t) = \begin{cases} C \cdot \sum_{n=0}^{N-1} a_n P_n(t) \exp[j\{2\pi(f_0 + f_n)t\}] & 0 \leq t \leq NT, \\ 0 & t > NT, \end{cases} \quad (1)$$

где N – размерность сигнала, $n = 0, 1, \dots, N-1$;

a_n – амплитуда сигнала;

f_n – код частоты, задаваемый массивом Костаса;

f_0 – несущая частота;

$P_n(t)$ – импульс единичной амплитуды длительности T :

$$P_n(t) = \begin{cases} P(t - nT) = 1, & t \in [nT, (n+1)T], \\ 0 & t \notin [nT, (n+1)T]. \end{cases} \quad (2)$$

$C = \sqrt{1/T \sum_{n=0}^{N-1} a_n^2}$ – нормирующий коэффициент, при котором $\int_{-\infty}^{\infty} |S(t)|^2 dt = 1$.

Основные параметры смоделированного эталонного сигнала представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры эталонного сигнала

Параметр	Значение
Размерность сигнала (количество частотных составляющих)	6
Значения частотных составляющих и их последовательность, МГц	100; 500; 400; 600; 200; 300
Длительность частотной составляющей, мкс	0.2
Количество периодов повторения	1

Затем смоделированный сигнал из блока 1 поступает в блок 2, где к нему добавляется белый гауссовский шум. На выходе блока 2 обеспечивается отношение сигнал/шум, равное минус 4 дБ.

После этого эталонный и зашумленный сигналы поступают в блок 3, где на основе билинейного частотно-временного преобразования Чоя–Вильямса, определяемого выражениями (3) и (4) [7], формируются частотно-временные портреты P_1 и P_2 , которые представлены на рис. 2.

$$P(l, \omega) = 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_N(n) \Phi(l, n) \exp(-j2\omega n), \quad (3)$$

где

$$\Phi(l, n) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} h_M(\mu) \frac{1}{\sqrt{4\pi n^2/\sigma}} \exp\left(-\frac{(\mu-l)^2}{4n^2/\sigma}\right) S(\mu+n) S^*(\mu-n), \quad (4)$$

где S – аналитический сигнал;

$h_N(n), h_M(\mu)$ – оконные функции;

σ – параметр, регулирующий уровень перекрестных составляющих.

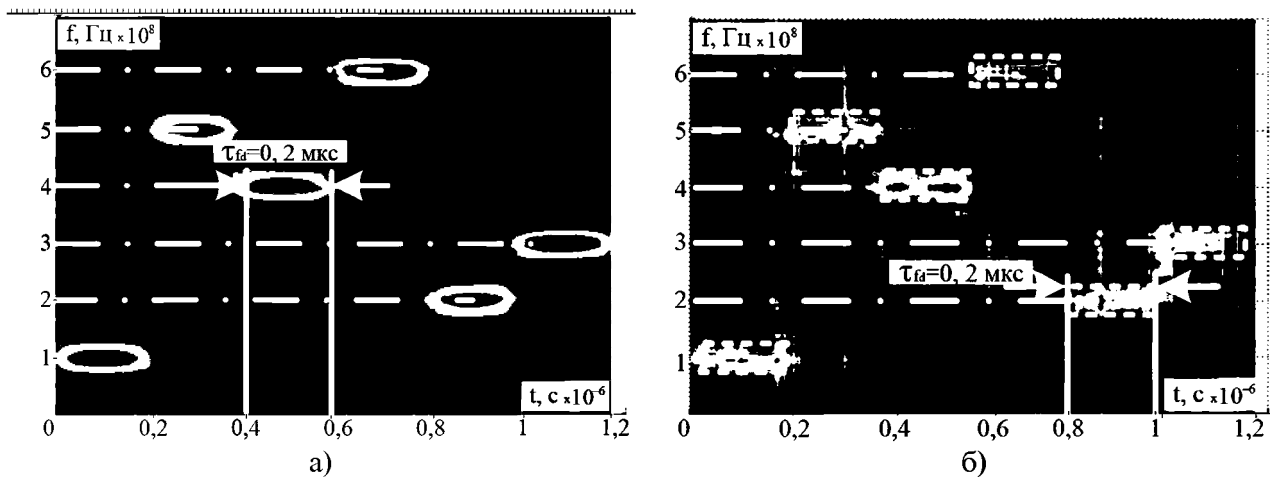


Рис. 2. Частотно-временные портреты на выходе блока 3:
а) эталонный сигнал, б) зашумленный сигнал

В блоке 4 реализуется фильтрация шумовой составляющей частотно-временного портрета P_2 с применением базовых вейвлет-функций, представленных в табл. 2. Пример частотно-временного портрета после вейвлет-фильтрации представлен на рис. 3.

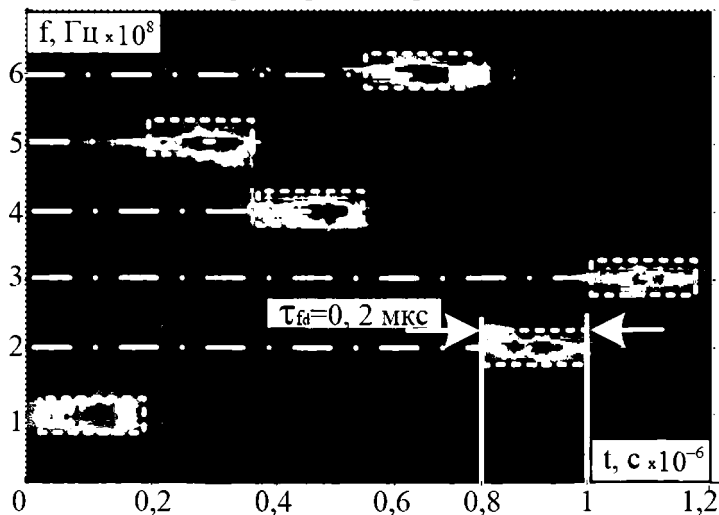


Рис. 3. Частотно-временной портрет зашумленного сигнала после вейвлет-фильтрации

Таблица 2. Сравнимые базовые типы вейвлет-функций

Типы базовых функций и их мнемонические названия		Количество уровней разложения
Хаара	haar	5
Мейра	dmey	5
Добеши	db: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	5
Симлета	sym: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	5
Морле	morl: 5,6,7,8,9	5
Биортогональный	bior: 1,1; 1,3; 1,5; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,1; 3,3; 3,5; 3,7; 3,9; 4,4; 5,5; 6,8	5
Обратный биортогональный	rbior: 1,1; 1,3; 1,5; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,1; 3,3; 3,5; 3,7; 3,9; 4,4; 5,5; 6,8	5

Оценку качества вейвлет-фильтрации частотно-временных портретов возможно проводить с использованием таких метрик, как среднеквадратичное отклонение, пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR), средняя абсолютная ошибка (MAE), а также двумерного коэффициента корреляции Пирсона. В данной статье для сравнительного анализа качества вейвлет-фильтрации будем использовать двумерный коэффициент корреляции Пирсона [9]:

$$R_k = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (P_1(m,n) - \bar{P}_1)(P_2'(m,n) - \bar{P}_2')}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (P_1(m,n) - \bar{P}_1)^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (P_2'(m,n) - \bar{P}_2')^2}}, \quad (5)$$

где $P_1(m,n)$ – отсчеты частотно-временного портрета эталонного сигнала;

$P_2'(m,n)$ – отсчеты частотно-временного портрета зашумленного сигнала после вейвлет-фильтрации.

Результаты моделирования вейвлет-фильтрации для данных базисных функций представлены ниже на графиках (рис. 4–10).



Рис. 4. Гистограмма распределения значений коэффициента корреляции для базовой вейвлет-функции Хаара при различных уровнях разложения

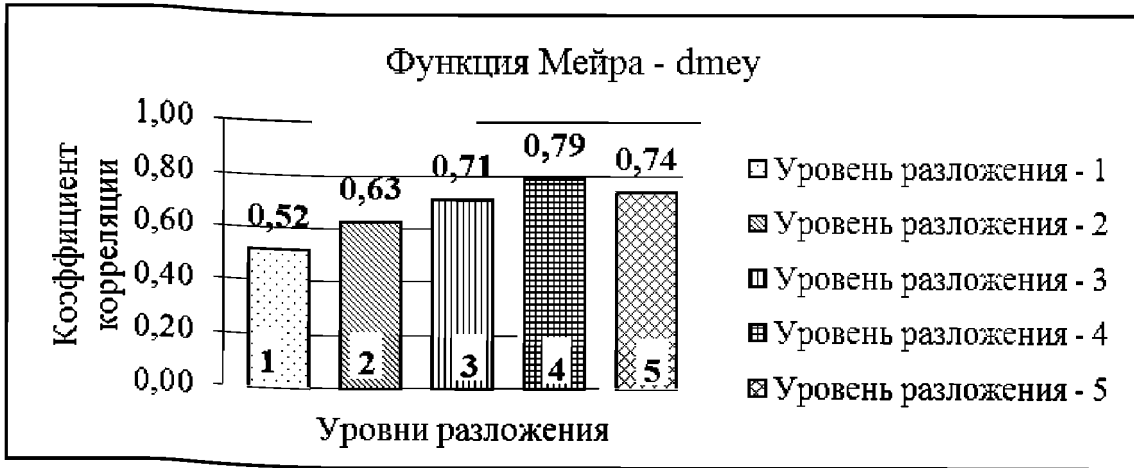


Рис. 5. Гистограмма распределения значений коэффициента корреляции для базовой вейвлет-функции Мейра при различных уровнях разложения

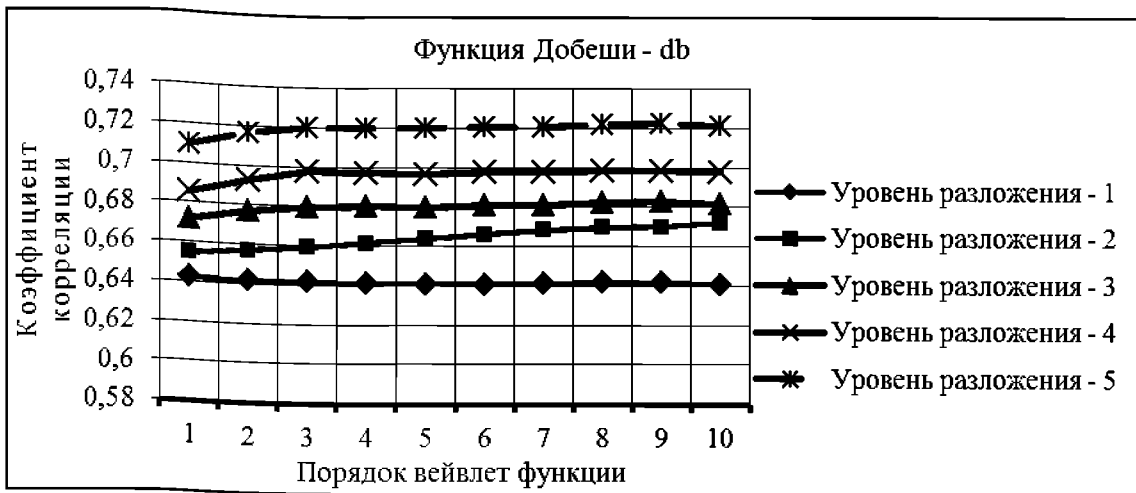


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента корреляции для базовой вейвлет-функции Добеши при различных уровнях разложения

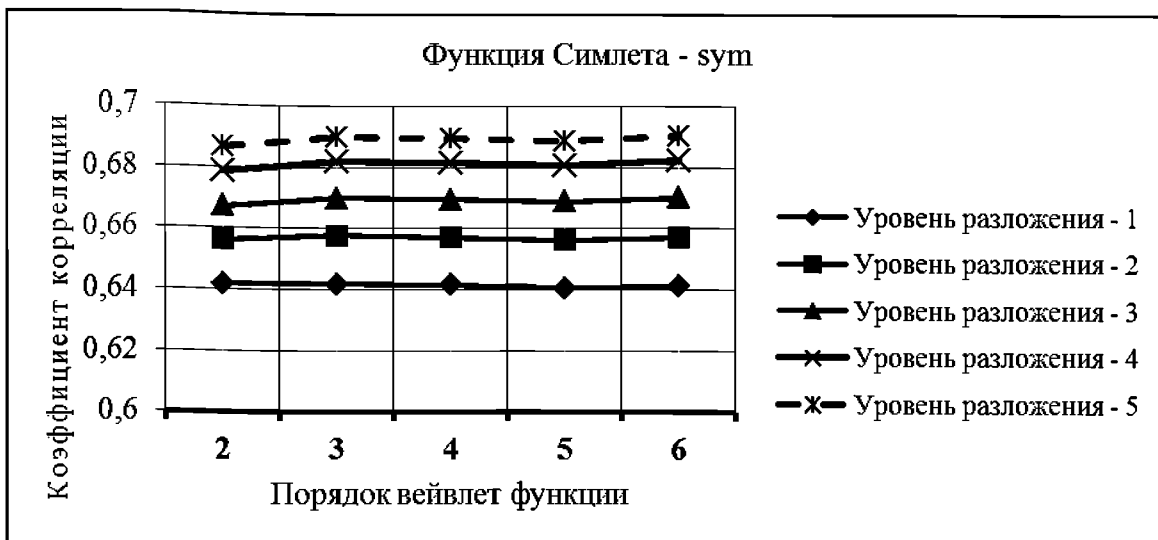


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента корреляции для базовой вейвлет-функции Симлета при различных уровнях разложения

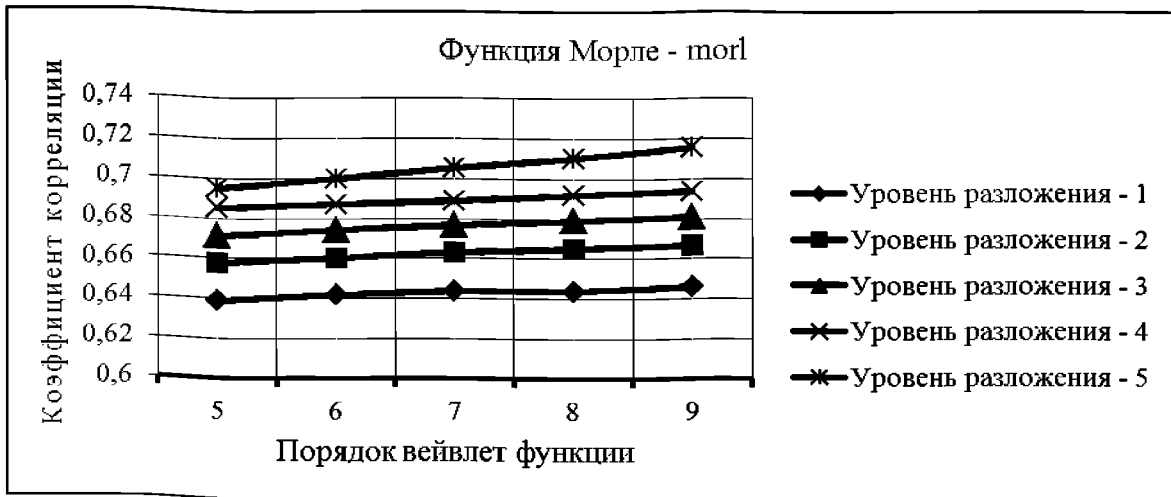


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента корреляции для базовой вейвлет-функции Морле при различных уровнях разложения

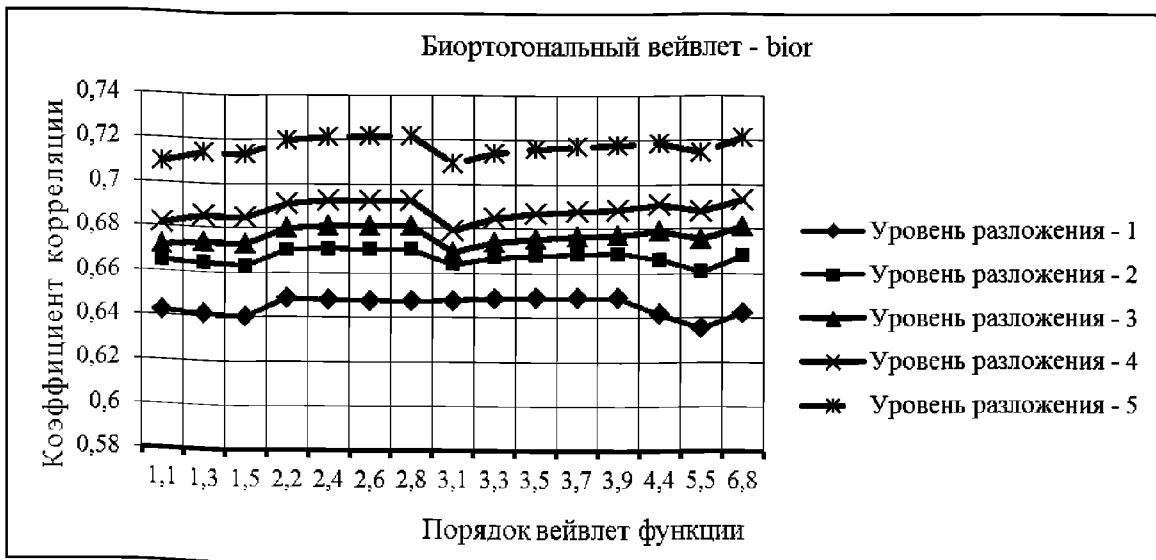


Рис. 9. Графики зависимости коэффициента корреляции для биортогональной вейвлет-функции при различных уровнях разложения

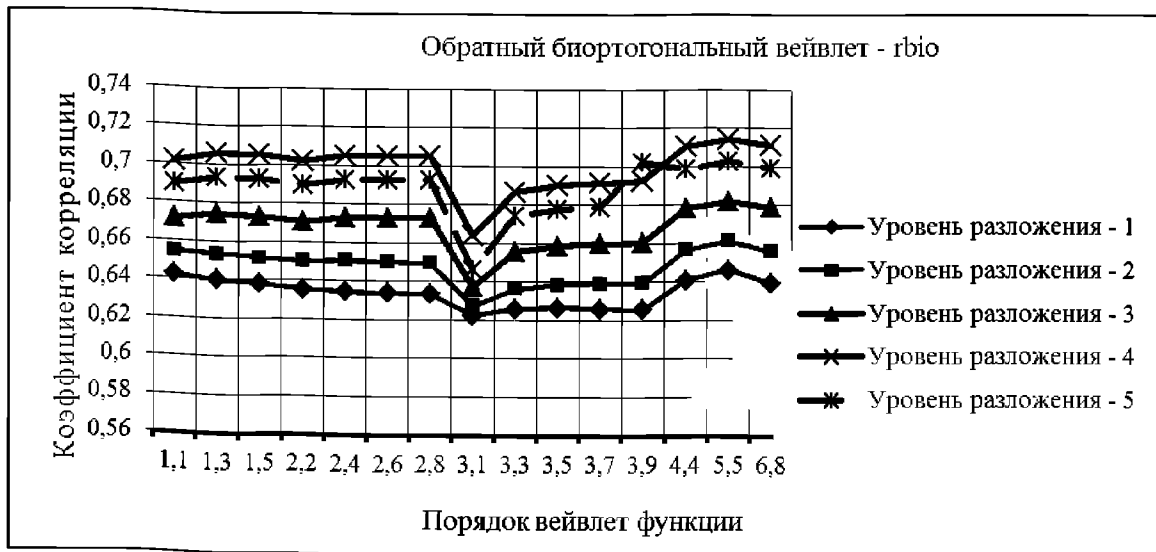


Рис. 10. Графики зависимости коэффициента корреляции для обратной биортогональной вейвлет-функции при различных уровнях разложения

Из графиков, приведенных на рис. 4–10, видно, что наибольшее значение коэффициента корреляции обеспечивается при использовании базовой функции Хаара и четвертого уровня разложения. Для этих параметров вейвлет-функции было проведено исследование влияния отношения сигнал/шум (в диапазоне от 10 до минус 12 дБ) на значение коэффициента корреляции. График полученной зависимости представлен на рис. 11.

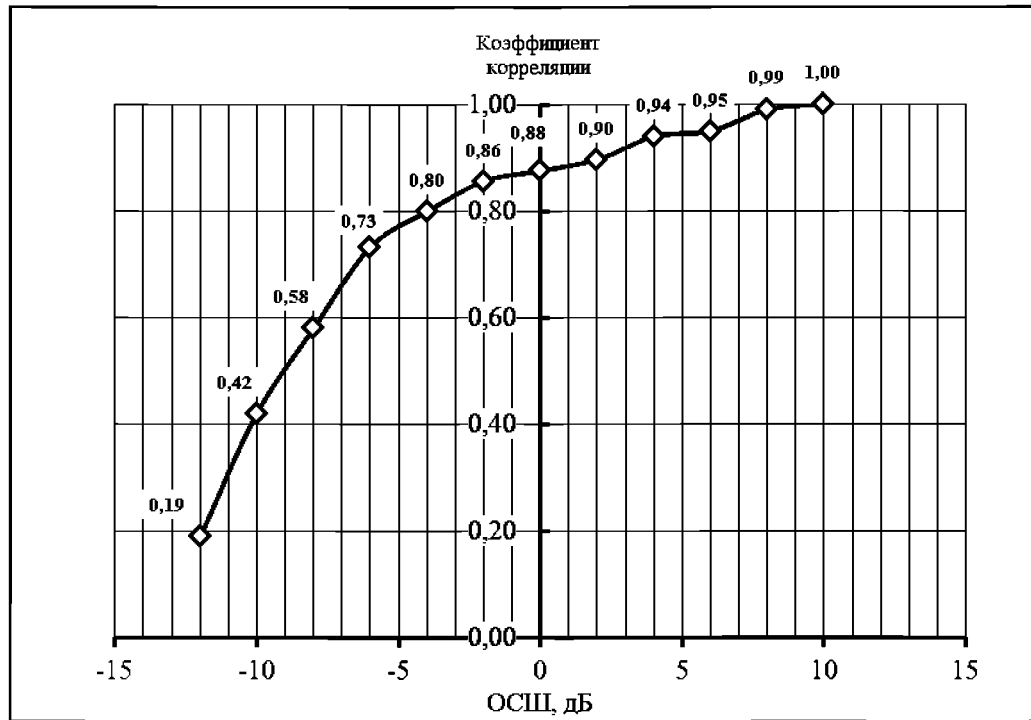


Рис. 11. График зависимости коэффициента корреляции для 4-го уровня разложения базовой вейвлет-функции Хаара от отношения сигнал/шум

3. Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. В условиях сложной сигнально-помеховой обстановки наиболее целесообразным является применение базовых функций Хаара и Мейра. При этом значение коэффициента корреляции находится в диапазоне от 0,79 до 0,8.

2. При увеличении порядка биортогонального и обратного биортогонального вейвлета проявляется тенденция снижения значения коэффициента корреляции на 2...4 %, что ограничивает возможности проведения технического анализа энергетически скрытых сигналов в средствах радиотехнического мониторинга.

3. Предложенная имитационная модель позволяет проводить оценку возможности повышения качества частотно-временных портретов радиосигналов за счет вейвлет-фильтрации шумовой составляющей и может быть реализована на различных аппаратно-программных платформах.

Литература

1. *Агиевич С. Н., Дворников С. В., Кудрявцев А. М., Кузнецов Г. Л.* Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов: монография // Под общ. ред. С. В. Дворникова и А. М. Кудрявцева. СПб.: ВАС, 2010.
2. *Коротков А. В.* Частотно-временной анализ сигналов малозаметных РЛС // АПСиОИ: Доклады Всероссийской научно-практической конференции, ВКА им. А. Ф. Можайского. СПб., 2014.
3. *Войнов Д. С., Уткин В. В.* Сигналы малозаметных радиолокационных станций // Деп. В ЦВНИ МО РФ 14.10.2015, № Б8677.
4. *Московский С. Б., Сергеев А. Н., Лалина Н. А.* Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2015. № 2 (15).
5. *Дворников С. В., Сауков А. М., Симонов А. Н.* и др. Патент РФ № 2261476 от 27.09.2005 г.
6. *Ясин А. С., Павлов А. Н., Храмов А. Е.* Цифровая вейвлет-фильтрация зашумленных данных: влияние порогового уровня и выбора вейвлета // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 1–7.
7. *Phillip E.* Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. Artechhouse, 2009.
8. *Плекин В. Я.* Широкополосные дискретно-кодированные сигналы в радиотехнике радиолокации. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2005. 64 с.
9. *Дьяконов В. П.* Вейвлеты. От теории к практике. М.: Солон-Р, 2002. 448 с.

*Статья поступила в редакцию 12.09.2017;
переработанный вариант – 20.10.2017.*

Уткин Владимир Владимирович

к.т.н., начальник кафедры Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники.

Коротков Виктор Анатольевич

к.т.н., доцент, доцент кафедры Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники.

Войнов Дмитрий Сергеевич

адъюнкт Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники, (630102, Череповец, ул. Первомайская 41, 81), e-mail: voinovdm@mail.ru.

Wavelet filtration application while radio technical monitoring

V. Utkin, V. Korotkov, D. Voynov

Based on the results of simulation modeling, the article gives a comparative analysis of wavelet filtration quality of the frequency temporal portraits of radio signals due to the noise component filtration.

Keywords: radio technical monitoring, hidden signals, wavelet filtration.