

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Научный совет РАН по комплексной проблеме «Распространение радиоволн»
Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика солнечно-земных связей»
Институт Радиотехники и электроники РАН

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Марийский государственный технический университет

Российский фонд фундаментальных исследований
Национальный комитет URSI
Российская секция IEEE
Объединенное физическое общество Российской Федерации
Правительство Республики Марий Эл

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

**XXI
ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

25-27 мая 2005 г.

ТОМ 2

Йошкар-Ола
2005

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

О.В. ЛАЗОРЕНКО¹, С.В. ЛАЗОРЕНКО², Л.Ф. ЧЕРНОГОР³

¹*Харьковский национальный университет радиозлектроники,
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина*

²*Международный Славянский университет,
ул. Отакара Яроша, 9А, г. Харьков, Украина*

³*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина,
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Вейвлет-анализ применен для исследования свойств ряда простых вещественных моделей сверхширокополосных (СШП) сигналов во временной области. Показано, что поскольку большинство вейвлетов по определению являются СШП сигналами, разложение анализируемых СШП сигналов по базисам вейвлетов оказывается полезным и удобным. Введены числовые характеристики эффективности разложения заданного СШП сигнала в выбранном вейвлетном базисе.

O.V. LAZORENKO, S.V. LAZORENKO, L.F. CHERNOGOR

Wavelet analysis for investigation of some properties of the simple real ultra-wideband (UWB) signal models in time-domain was applied. It was shown that a decomposition of analyzed UWB in wavelet series is useful and convenient because of the major set of wavelets is the UWB signals by definition. Some numerical characteristics of the UWB signal decomposition effectiveness in chosen wavelet basis were entered.

Введение

В конце XX – начале XXI века в различных областях науки и техники возник интерес к применению новых нетрадиционных видов сигналов, обладающих большими возможностями, чем традиционные узкополосные и широкополосные сигналы (см., например, [1, 2]). Одним из таких видов сигналов оказались сверхширокополосные (СШП) сигналы. По определению под СШП сигналом понимают сигнал, показатель широкополосности μ которого удовлетворяет условию $\mu_{\min} \leq \mu < 2$. По определению, (см., например, [1]) $\mu = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$, где f_{\min} , f_{\max} — минимальная и максимальная частоты функции спектральной плотности сигнала. В качестве μ_{\min} обычно выбирают значение 0,5 (см., например, [1, 3]).

СШП сигналы уже успешно используют в различных областях науки и техники, например, для дистанционного радиозондирования снегового и ледяного покровов, подповерхностной радиолокации, всепогодной ближней радиолокации, связи с погруженными подводными лодками и т. д. [1, 2]. В [4, 5] обсуждаются другие применения СШП сигналов и, в частности, для исследования околоземного космического пространства. Следует также отметить, что сейчас продолжают появляться все новые виды СШП сигналов. Наряду с, по-видимому, ставшими уже классическими ультракороткими СШП (УКСШП) сигналами появились прямохаотические СШП (ПХСШП) сигналы, имеющие ряд интересных свойств, подробно описанных в [6].

Вместе с тем применение новых видов сигналов требует использования новых математических методов описания таких сигналов. Одним из таких новых методов является вейвлет-анализ (см., например, [7 – 10]). Поэтому исследование возможности применения вейвлет-анализа для описания СШП сигналов является актуальным.

Целью работы является проведение вейвлет-анализа модельных СШП сигналов во временной области. Для этого необходимо провести вейвлет-анализ модельных СШП сигналов методом непрерывного вейвлет-преобразования, построить скелетоны и скалограммы полученных вейвлет-спектров, сравнить результаты вейвлет-анализа с результатами одномерного и двумерного (динамического) преобразования Фурье.

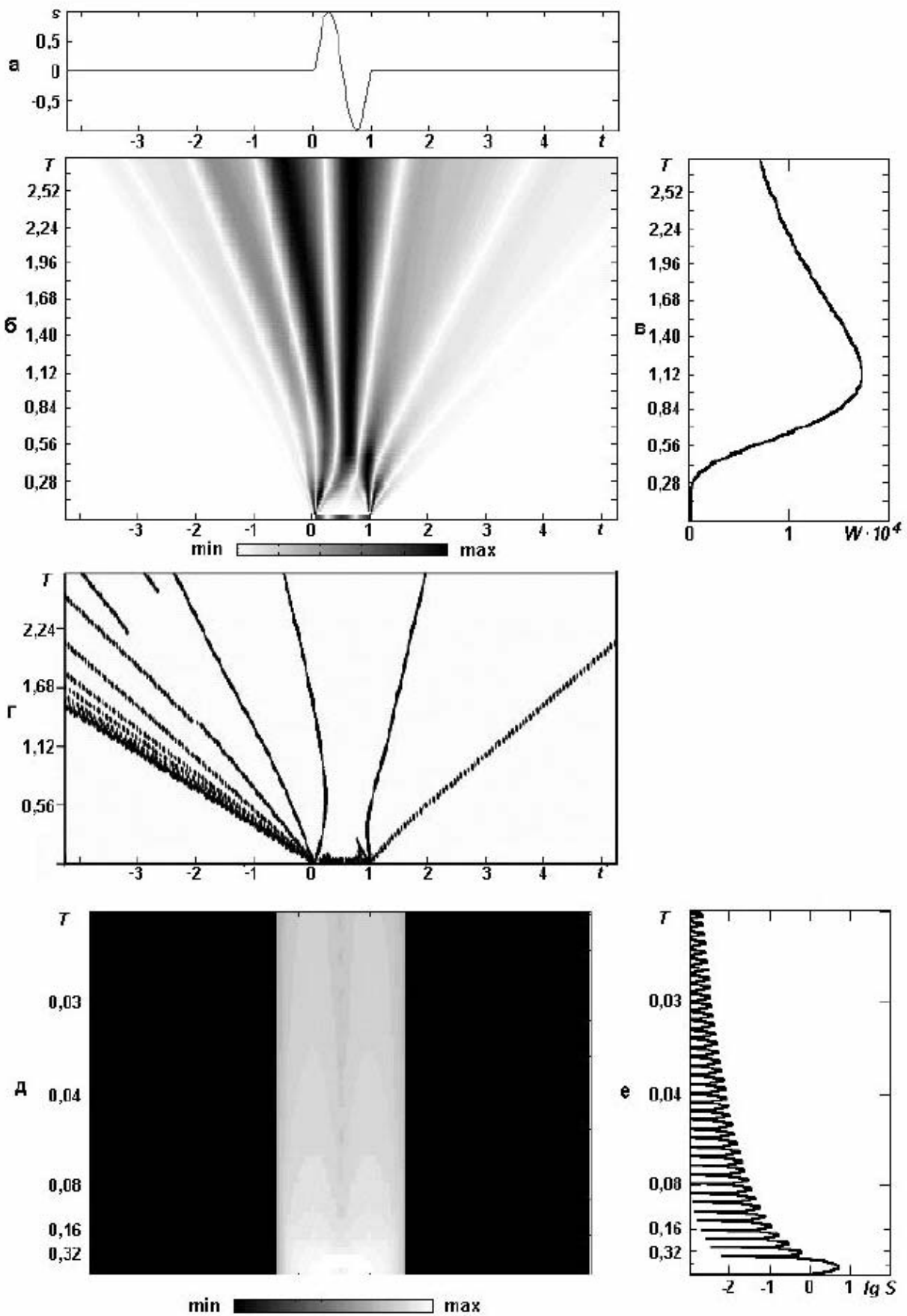


Рис. 1. Анализ СШП сигнала (модель $s_1(t)$, число лепестков $N = 2$): а – сигнал во временной области, б – непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в – скалограмма, г – скелетон, д – динамический Фурье-спектр, е – одномерный Фурье-спектр

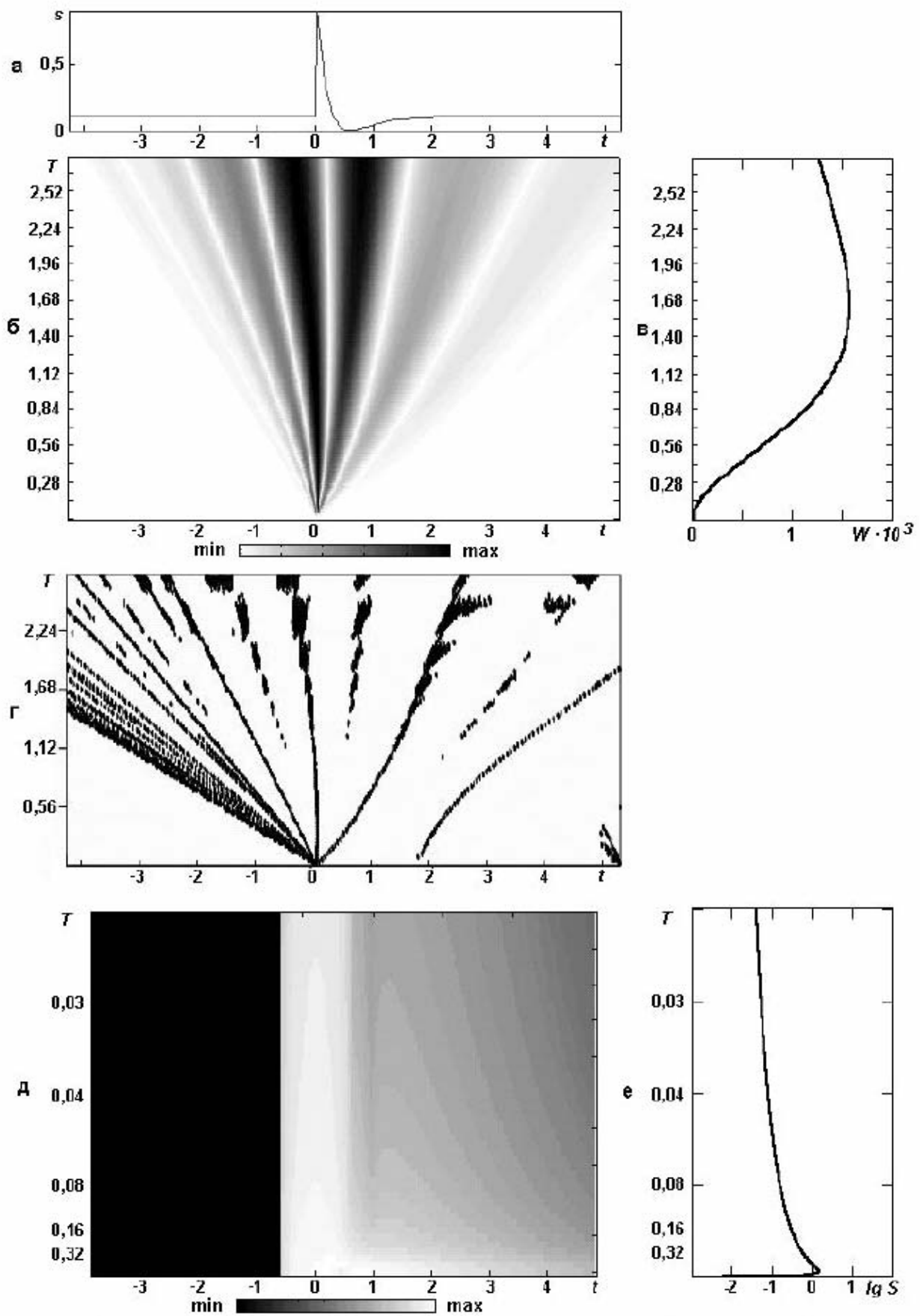


Рис.2. Анализ СШП сигнала (модель $s_2(t)$): а – сигнал во временной области, б – непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в – скалограмма, г – скелетон, д – динамический Фурье-спектр, е – одномерный Фурье-спектр

Модели СШП сигналов

Для анализа поведения СШП сигналов удобно использовать разработанные авторами и приведенные в [4, 5, 11] простые аналитические вещественные модели таких сигналов во временной области. В работе использовались все восемь моделей. Аналитические выражения для двух моделей, анализ которых приведен на рис. 1 и рис. 2, имеют вид

$$s_1(t) = (-1)^n \sin(2\pi nt)\Theta(t), \quad s_2(t) = (1-t/\tau) \exp(-t/\tau)\eta(t),$$

где $\Theta(t) = \eta(t) - \eta(t-1)$, $\eta(t)$ – функция Хэвисайда, $N = 2n$, N – количество лепестков СШП сигнала, τ – длительность импульса. Модель $s_1(t)$ описывает обычный УКСШП сигнал, а модель $s_2(t)$ – импульс давления [12], возникающий при воздушном взрыве.

Непрерывное вейвлет-преобразование

Непрерывный вейвлет-спектр $W(a, b)$ любого сигнала определяется как самой моделью сигнала $s(t)$, так и используемым для разложения вейвлетным базисом, а значит, вейвлетобразующей функцией $\psi(t)$, порождающей этот базис (см., например, [7 – 10]). Соответствующее выражение для прямого непрерывного вейвлет-преобразования имеет вид:

$$W(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \tilde{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где a – параметр масштабирования, b – параметр сдвига, $\tilde{\psi}(t)$ – функция комплексно сопряженная к $\psi(t)$. При вейвлет-анализе, кроме изучения непосредственно поведения вейвлет-спектра $W(a, b)$, оказывается полезным рассмотрение скелетона – линий, соединяющих локальные максимумы и минимумы поверхности $W(a, b)$, и скалограммы, определяемой соотношением

$$W(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W(a, b)|^2 db.$$

По внешнему виду скелетона можно обнаруживать локальные особенности сигнала (см., например, [7 – 9]). Скалограмма отвечает за распределение энергии сигнала по компонентам разных масштабов и позволяет по наличию максимумов обнаруживать присутствие доминирующих составляющих и количественно оценивать их периоды (см., например, [7 – 9]).

Результаты вейвлет-анализа

Непрерывный вейвлет-анализ модельных СШП сигналов проводился методом численного моделирования с использованием пакета WaveLab 2.2 из состава системы компьютерной математики (СКМ) MATLAB 6.5, а также СКМ MathCad 2001. В качестве базисных вейвлетов применялись вейвлеты Хаара, Добеши, Койфмана, Гаусса, Морле, симлеты, биортогональные и обратные биортогональные вейвлеты. В качестве примера рассмотрим вейвлет-анализ двух описанных выше моделей СШП сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ (рис. 1, 2), проведенный с использованием вейвлетного базиса, построенного с помощью вейвлета Добеши 4 порядка (db4). На рис. 1 и рис. 2 для удобства на графиках вейвлет-спектров, скелетонов и скалограмм вместо параметра масштабирования a указывается период компонент сигнала T в единицах безразмерного времени, которое отложено по оси абсцисс на рис. 1, а и рис. 2, а. Аналогичный переход к T от безразмерной частоты F выполнен и для спектров Фурье.

При анализе модели $s_1(t)$ с $\mu \approx 1,58$ вейвлет-спектр (рис. 1, б) и скелетон (рис. 1, г) позволяют четко локализовать сигнал во временной области. При $t=0$ и $t=1$ скелетон показывает наличие разрыва непрерывности первой производной сигнала (несколько прямых, выходящих из одной точки), что легко подтверждается аналитически. По углу наклона данных прямых можно судить о характере разрыва. Скалограмма (рис. 1, в) свидетельствует о наличии достаточно выраженного доминирующего периода колебаний ($T=1$), что полностью согласуется с рис. 1, а. Следует отметить, что удастся выявить этот период при наличии всего лишь двух лепестков СШП сигнала. В то же время динамическое преобразование Фурье (рис. 1, д) при ширине временного окна, равной 0,1 от длины реализации, дает ошибку при определении локализации СШП сигнала во временной области примерно в 2 раза.

Вейвлет-анализ модели $s_2(t)$ с $\mu \approx 1,85$ также дает интересные результаты. Резкий (фактически бесконечный) скачок производной сигнала при $t = 0$ приводит к появлению на вейвлет-спектре (рис. 2, б) и особенно на скелетоне (рис. 2, г) пучка расходящихся прямых, отличающегося от аналогичного пучка на рис. 1, г, где скачок производной был конечным. По скелетону можно определить и длительность сигнала во временной области, поскольку окончанию сигнала соответствует наклоненная вправо кривая линия, выходящая из окрестности точки $t = 1,7$ на оси абсцисс. Примерно тот же характерный период колебаний ($T \approx 1,7$) дает скалограмма (рис. 2, в), хотя максимум на ней оказывается гораздо более размытым, чем на рис. 1, в. Последнее объясняется несимметричностью сигнала $s_2(t)$. Определить длительность сигнала с помощью динамического спектра Фурье (рис. 2, д) оказывается достаточно сложно и визуально сигнал кажется длиннее в 1,5 – 2 раза. К тому же его передний фронт оказывается в области отрицательных t . Одномерный спектр Фурье данного сигнала имеет выраженный максимум и достаточно слабо спадает с увеличением частоты, что объясняется большим ($\mu \approx 1,85$) значением показателя широкополосности.

Обсуждение

Проведенные исследования показывают, что применение вейвлет-анализа для описания СШП сигналов является полезным и перспективным, поскольку большинство вейвлетов по определению являются именно СШП сигналами (см., например, [4, 5]). Вейвлет-анализ, в частности, непрерывное вейвлет-преобразование, позволяют более точно, чем методы преобразования Фурье, описывать локальные особенности СШП сигнала. Это оказывается важным, поскольку для СШП сигнала основной информационной характеристикой является именно его форма во временной области. Вместе с тем, не следует отказываться от применения традиционного преобразования Фурье, противопоставляя ему вейвлет-анализ. Представляется целесообразным проведение совместного Фурье- и вейвлет-анализа сигналов, например, по схеме, предложенной на рис. 1 и рис. 2.

Выводы

1. Для описания СШП сигналов удобно применять вейвлет-анализ.
2. Вейвлет-анализ позволяет выявить локальные особенности СШП сигналов и точнее описать главную информационную характеристику СШП сигнала – его форму.
3. Применение вейвлет-анализа целесообразно проводить параллельно с использованием традиционных методов преобразования Фурье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. Москва, Радио и связь, 1989, 192 с.
2. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. Москва, Радио и связь, 1985, 376 с.
3. Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems. First report and order. FCC 02-48. Federal Communications Commission, 2002.
4. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия. 2002, т. 7, №1, с. 46 – 63.
5. Chernogor L.F., Lazorenko O.V., Lazorenko S.V. Wavelet Analysis and Ultra-wideband signals // Radio Physics and Radio Astronomy. 2002, v. 7, № 4, p. 471 – 474.
6. Дмитриев А. С., Кузьмин Л. В., Панас А. И., Пузиков Д. Ю., Старков С. О. Прямохаотические системы связи // Успехи современной радиоэлектроники, 2003, №9, с. 40 – 56.
7. Daubechies I. Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. – SIAM Ed., 1992.
8. Чуи К. Введение в вейвлеты. Пер. с англ. Я. М. Жилейкина. М.: Мир, 2001.
9. Астафьева Н. М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996, т. 166, № 11, с. 1115 – 1170.
10. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории – к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002.
11. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Дисперсионные искажения высокочастотных сверхширокополосных радиосигналов в ионосфере // Геомагнетизм и астрономия. 1997, т. 37, №6, с. 80 – 90.
12. Обнаружение ядерных испытаний. Тематический выпуск ТИИЭР. 1965, т. 53, №12.