

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ АТОМАРНЫМИ ФУНКЦИЯМИ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

В. Ф. Кравченко, Д. В. Чуриков

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова, Российская Академия наук
E-mails: kvf@pochta.ru, mpio_nice@mail.ru

Рассматривается преобразование сверхширокополосных (СШП) сигналов с помощью семейства атомарных функций (АФ). Излагаются основы время-частотного преобразования типа Вигнера и непрерывного вейвлет-анализа. На конкретных физических моделях приведена обработка СШП сигналов. Анализ преобразований Кравченко-Вигнера, фильтрация, а также обнаружение сигналов на фоне помех показывают эффективность их применения к задачам обработки СШП сигналов в антенной технике.

Введение

Для снижения энергетических затрат, а также для повышения помехозащищенности в антенной технике используются сверхширокополосные зондирующие сигналы [1-6]. Под СШП сигналом понимают сигнал, показатель широкополосности μ которого удовлетворяет условию $\mu_{\min} \leq \mu < 2$. Согласно [1-5]

$$\mu = 2 \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}}, \quad (1)$$

где f_{\min} , f_{\max} — минимальная и максимальная частоты функции спектральной плотности сигнала (ФСП). Особенностью СШП сигналов является то, что они переносят объем информации в $\mu / \mu_n \gg 1$ раз больше, чем узкополосные и широкополосные, для которых показатель $\mu_n \ll 1$. На практике μ_{\min} выбирается равным 0,5. Тогда выражение (1) запишем в виде

$$\mu = \frac{2}{f_0 \tau} = \frac{2T_0}{\tau}. \quad (2)$$

Здесь $f_0 = (f_{\min} + f_{\max}) / 2$ — средняя частота ФСП сигнала, $T_0 = f_0^{-1}$ — средний период колебаний, $\tau = 2 / (f_{\max} - f_{\min})$ — длительность сигнала. Из этого выражения видно, что сверхширокополосному процессу соответствует эквивалентный кратковременный знакопеременный сигнал длительностью $\tau \leq \tau_{\max} = 2(\mu f_0)^{-1}$. При $\mu = 0,5 \div 2$ имеем $\tau_{\max} \approx (1 \div 4) f_0^{-1}$. Для анализа и обработки СШП сигналов используем время-частотные преобразования, такие как преобразование Кравченко-Вигнера и вейвлет-преобразование.

Преобразование Кравченко-Вигнера

Для анализа СШП сигналов воспользуемся преобразованием Кравченко-Вигнера (ПКВ), которое задается следующим [2,3,8] соотношением:

$$P_{SPV} f(\omega, \tau; h, g) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \int_{-\infty}^{\infty} g(s - \tau) f\left(s + \frac{t}{2}\right) f^*\left(s - \frac{t}{2}\right) ds \exp(-i\omega t) dt. \quad (3)$$

Здесь $h(t)$, $g(t)$ — атомарные функции (АФ) [2-4,7-9], а символ «*» обозначает операцию комплексного сопряжения. Это преобразование квадратично по изучаемому процессу (сигналу) $f(t)$. Применение ВФ позволяет уменьшить влияние интерференционных членов, возникающих при обработке суммы двух сигналов. При $g(t) = \delta(t)$ ПКВ переходит в псевдо-преобразование Вигнера (ППВ) [2,3].

Вейвлет-преобразование

Непрерывное вейвлет-преобразование [2-4] определяется так

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(t) f(t) dt, \quad (4)$$

которое представляет собой свёртку сигнала $f(t)$ с функцией $\psi_{a,b}(t)$, переводящую его в вейвлетную область с базисными функциями

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (5)$$

Здесь a и b являются параметрами растяжения и сдвига материнского вейвлета. Обратное преобразование имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial a \partial b}{a^2} W_{a,b} \psi_{a,b}, \quad (6)$$

где $C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|\omega|} |\widehat{\psi}(\omega)|^2 d\omega$. Используем ортогональные вейвлеты на основе АФ, рассмотренные в [4].

Модели сверхширокополосных (СШП) сигналов

Рассмотрим модели следующих сверхширокополосных сигналов [2,3]:

1. $y_1(t) = -\left(H\left(\frac{t+0,5}{\tau}\right) - H\left(\frac{t-0,5}{\tau}\right)\right) \cdot \text{sgn}(t),$
2. $y_2(t) = (-1)^n \cdot \sin\left(\pi n \frac{t}{\tau}\right) \cdot \exp\left(-\left|\frac{t}{\tau}\right|\right) \cdot \left(H\left(\frac{t}{\tau}+1\right) - H\left(\frac{t}{\tau}-1\right)\right),$
3. $y_3(t) = -\frac{2t}{\tau^2} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right),$
4. $y_4(t) = -\frac{2}{\tau^2} \left(1 - \frac{2t^2}{\tau^2}\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right),$
5. $y_5(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{2\tau}\right)^2\right) n! \sum_{k=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} \left(-\frac{1}{2}\right)^k \frac{(t/\tau)^{n-2k}}{(n-2k)! k!},$
6. $y_6(t) = t \cdot \exp\left(-9\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right).$

Здесь $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases}$ – функция Хевисайда, а $\text{sgn}(t)$ – функция характеризующая знак аргумента. Их графики, а также физические характеристики приведены [3].

Численный эксперимент

1. Примеры время-частотных ПКВ СШП сигналов с ядрами на основе АФ приведены на рис. 1-4. Интенсивность яркости соответствует модулю значения преобразования в соответствующей точке.

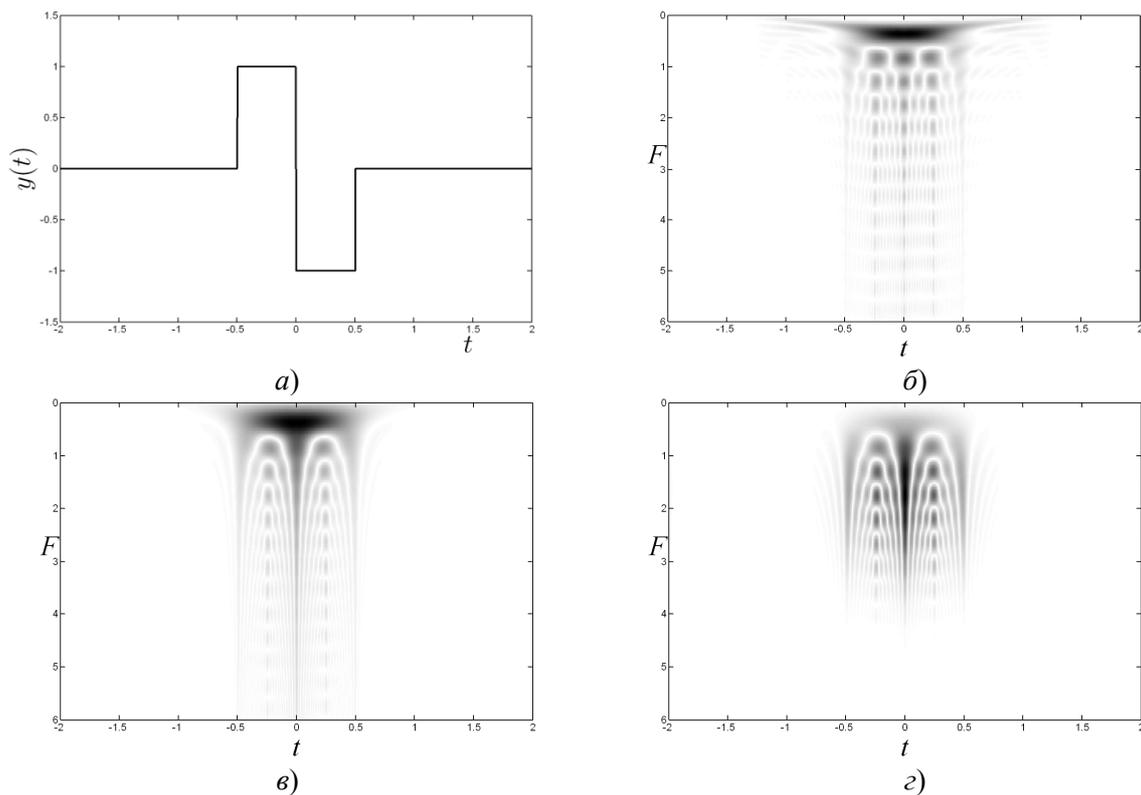


Рис. 2. Тестовый сигнал $y_1(t)$ (а), преобразования Вигнера (б), Кравченко-Вигнера для $h(t) \equiv 1$,

$$g(t) = \text{fup}_4\left(\frac{3}{2}t\right) \text{ (в)}, h(t) = \text{fup}'_4\left(\frac{3}{2}t\right), g(t) = \text{fup}_4\left(\frac{3}{2}t\right) \text{ (г)}$$

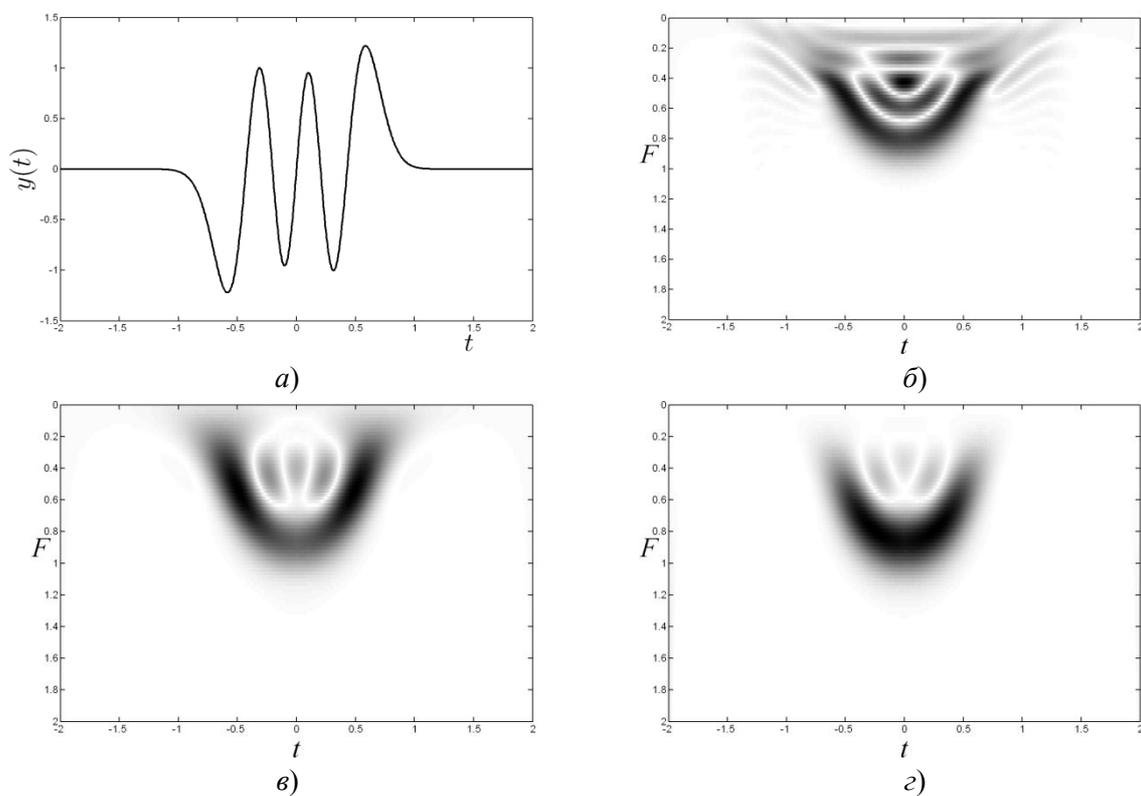


Рис. 4. Тестовый сигнал $y_3(t)$ (а), преобразования Вигнера (б), Кравченко-Вигнера для $h(t) \equiv 1$,

$$g(t) = \Xi_4\left(\frac{t}{2}\right) \text{ (в)}, h(t) = \Xi'_4\left(\frac{t}{2}\right), g(t) = \Xi_4\left(\frac{t}{2}\right) \text{ (г)}$$

2. Преобразования тестовых сигналов вейвлетами Кравченко $\{\widetilde{h}_a(t)\}$ [4,9] представлено на рис. 5-8.

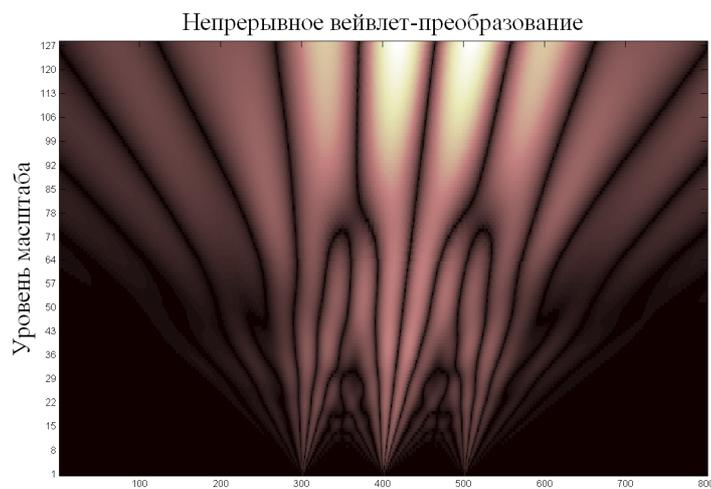


Рис. 5. Непрерывное вейвлет-преобразование тестового сигнала $y_1(t)$

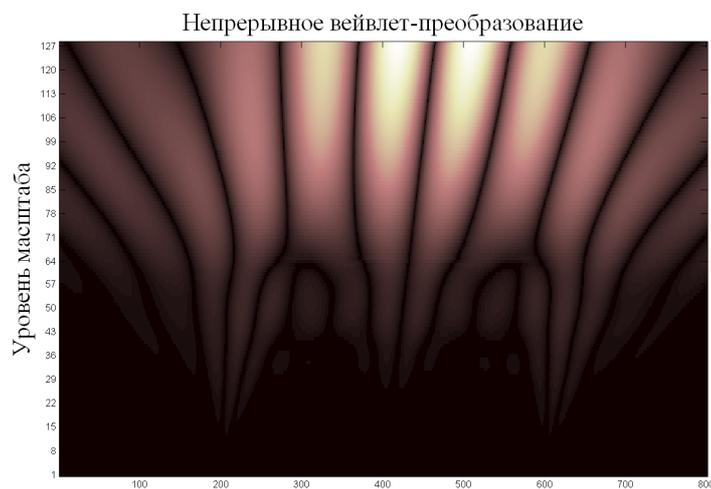


Рис. 6. Непрерывное вейвлет-преобразование тестового сигнала $y_2(t)$

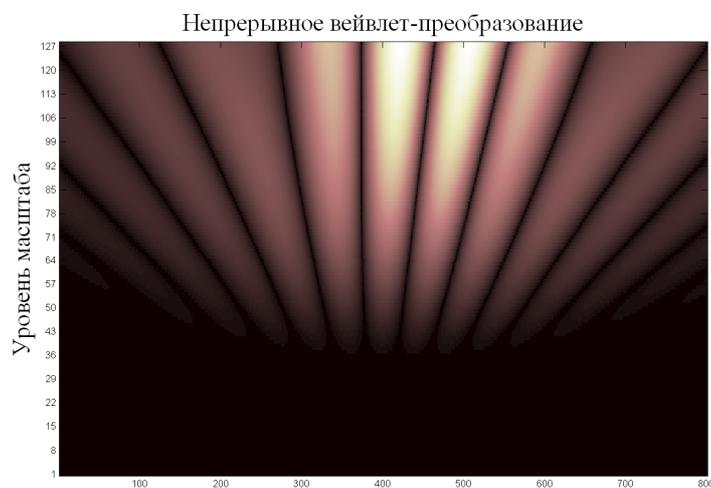


Рис. 7. Непрерывное вейвлет-преобразование тестового сигнала $y_3(t)$

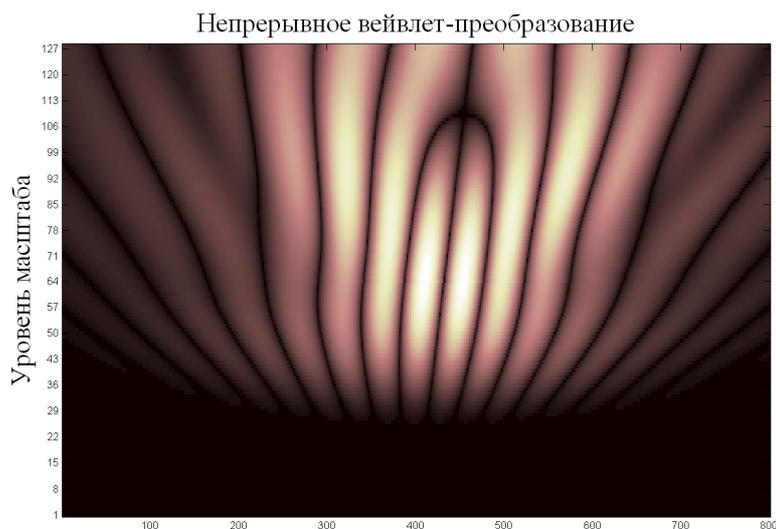


Рис. 8. Непрерывное вейвлет-преобразование тестового сигнала $y_5(t)$

Выводы

Рассмотрена обработка СШП сигналов на основе АФ и исследованы время-частотные преобразования Вигнеровского типа с применением WA-систем функций. Физический анализ проведенных численных экспериментов подтвердил потенциальные возможности нового подхода при цифровой обработке СШП сигналов.

Работа выполнена в рамках гранта НШ-5708.2008.9 «Новые методы в некоторых задачах акустооптики, радиофизики и медицины на основе атомарных функций, вейвлетов и фракталов».

Литература

1. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009.
2. Кравченко В.Ф., Рвачёв В.Л. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях. М.: Физматлит. 2006.
3. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит. 2007.
4. Кравченко В.Ф., Лабунько О.С., Лерер А.М., Синявский Г.П. Вычислительные методы в современной радиофизике / под ред. В.Ф.Кравченко. М.: Физматлит. 2009.
5. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов. М.: Сов. Радио, 1970.
6. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации/под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008.
7. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. М.: Радиотехника. 2003.
8. Кравченко В.Ф., Чуриков Д.В. Новые алгоритмы пространственно-временной цифровой обработки сигналов в антенных системах. Антенны, 2008, вып. 4(131), с.47-54.
9. Kravchenko, V.F., Churikov, D.V. A new class of orthogonal kravchenko WA-system functions $\{\widehat{h}_a(t)\}$ // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 68. No. 8. P. 649-666, 2009.

DIGITAL ULTRAWIDEBAND SIGNAL PROCESSING ON BASIS OF ATOMIC FUNCTION IN ANTENNA TECHNIQUES

V.F. Kravchenko, D.V. Churikov

Kotel'nikov Institut of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow
E-mails: kvf@pochta.ru, mpio_nice@mail.ru

In work ultrawideband (UWB) signal processing on basis of atomic functions (AF) family is considered. Time-frequency Kravchenko-Wigner transformations and the continuous wavelet analysis are stated. On concrete physical models UWB signal processing is resulted. The analysis of Kravchenko-Wigner transformations, filtration, and also detection of signals show efficiency of their application to problems of UWB signal processing in the antenna techniques

Секция: Применение атомарных и R – функций в антенной технике

Авторы:

Кравченко В.Ф. – заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук, профессор, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
тел.: 8-(495)-629-33-65

Область научных интересов: R-функции, атомарные функции, вейвлеты, электродинамика сверхпроводящих структур, анализ и синтез антенн, прикладные математика и физика, дистанционное зондирование неоднородных сред.
E-mail: kvf@pochta.ru

Чуриков Д.В. – научный сотрудник, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
тел.: 8-(495)-629-33-65, 8-(903)-815-18-97,

Область научных интересов: R-функции, атомарные функции, вейвлеты, цифровая обработка сигналов.
E-mail: mpio_nice@mail.ru