

УДК 621.391

**ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ
В БАЗИСАХ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИЙ**

*д-р техн. наук, проф. С.В. ДВОРНИКОВ; канд техн. наук, доц. А.А. ПОГОРЕЛОВ;
канд. техн. наук, доц. С.С. МАНАЕНКО; К.К. КИСЛИЦИНА
(Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург);
А.В. ЖЕЛЕЗНЯК
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»);
С.С. ДВОРНИКОВ
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет);
Д.С. РЯБЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты исследования возможности формирования фазоманипулированных сигналов разнополярными фрагментами вейвлет-функций Гаусса первого порядка. Обосновываются энергетические параметры синтезированных вейвлет-сигналов и анализируется их помехоустойчивость. Получены модулированные колебания, помехоустойчивость которых превосходит потенциально возможные показатели для ФМ-2 сигналов, сформированных в базисе гармонических функций. Данный эффект может быть усилен при увеличении числа различных используемых вейвлетов, применяемых для синтеза итогового сигнала.

Введение. Повышение помехоустойчивости является приоритетным вопросом при разработке техники радиосвязи. Среди широко известных модуляционных форматов наиболее помехоустойчивым является двухпозиционная фазовая манипуляция (ФМ-2) [1]. Именно поэтому данный модуляционный формат находит широкое применение на радиопередачах КВ- и УКВ-диапазонов.

Физическая сущность формата ФМ-2 заключается в инвертировании несущего колебания при смене информационной посылки, т.е. для синтеза сигналов ФМ-2 достаточно наличия двух фрагментов гармонических сигналов, начальные фазы которых сдвинуты друг относительно друга на 180° .

Следовательно, для формирования формата ФМ-2 достаточно наличия любых двух ортогональных функций. В связи с этим предлагается в качестве таковых использовать вейвлет-функции, обладающие высокими свойствами помехоустойчивости [1].

В данном исследовании рассматриваются вопросы синтеза сигналов модуляционного формата ФМ-2 на основе вейвлетов семейства функций Гаусса первого порядка и исследуются их помехоустойчивость в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Здесь и далее под модуляционным форматом будем понимать совокупность вида модуляции и скорости передачи, определяемой длительностью бодовой посылки.

Предложения по синтезу вейвлет-сигналов. Вопросы повышения помехоустойчивости за счет использования базисов формирования сигналов, отличных от гармонических, рассматривались в [2], где предлагалось осуществлять синтез сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина – Крестенсона, которые являются обобщающими по отношению к базису функций Фурье. Причем результаты моделирования показали, что у синтезируемых конструкций помехоустойчивость более высокая по сравнению с сигналами, сформированными в гармонических базисах.

В связи с этим выясним, насколько полученные результаты применимы к сигналам, сформированным в вейвлет-базисах. В качестве исходного модуляционного формата определим двухпозиционную фазовую манипуляцию и рассмотрим основные этапы ее реализации.

Скорость передачи сигналов ФМ-2 определяется минимальной длительностью фрагмента τ_c , в пределах которого фаза сигнала остается постоянной. Указанный интервал представляет собой элемент сигнала ФМ-2.

Согласно [1], процедура синтеза сигналов ФМ-2 заключается в следующем. У несущего колебания определенной частоты с заданной скоростью манипуляции происходит изменение значения фазы на 180° в соответствии с информационной последовательностью логических нулей и единиц.

Анализ известного метода формирования сигнала ФМ-2 показывает, что модулированный сигнал можно рассматривать как совокупность повторяющихся элементов, соответствующих значениям логических нулей и единиц.

Указанные обстоятельства позволяют предложить представленный ниже подход к его синтезу.

На первом этапе формируются элементы сигнала $s1(t)$ и $s0(t)$, соответствующие логическим нулю и единице (рис. 1). Причем длительности элементов τ_c выбираются таким образом, чтобы соответствовать требуемой скорости манипуляции $V = 1/\tau_c$.

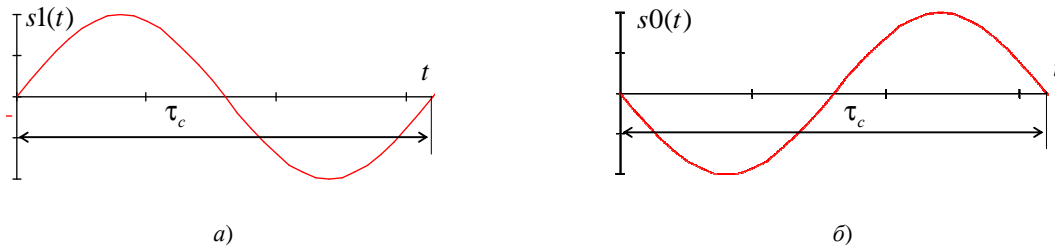


Рис. 1. Элементы сигнала ФМ-2:
а – логической единицы; б – логического нуля

На втором этапе согласно информационной последовательности из сформированных элементов сигнала $s1(t)$ и $s0(t)$ конструируется требуемая модуляционная конструкция. В результате получаем ФМ-2 сигнал, аналогичный по структуре сигналу, синтезируемому согласно [1].

Предложенный подход открывает новые возможности по синтезу ФМ-2 сигналов на основе произвольных импульсных фрагментов, в том числе вейвлетов, если в качестве элементов сигнала $s1(t)$ и $s0(t)$ определить, в частности, так называемый вейвлет Гаусса первого порядка $\psi(t)$, представляющий первую производную от функции Гаусса [3].

Аналитически вейвлет Гаусса первого порядка описывается следующим выражением:

$$\psi(t) = -t \exp(-t^2/2). \tag{1}$$

Анализ выражения (1) указывает на локализованный характер функции, т.е. синтез непрерывного колебания на его основе в принципе невозможен. Однако вейвлет Гаусса вполне может быть использован в качестве фрагмента для синтеза сигнала ФМ-2 в соответствии с предложенным подходом.

Так, на рисунке 2 представлены элементы сигнала $\psi1(t)$ и $\psi0(t)$, сформированные на основе вейвлета Гаусса.

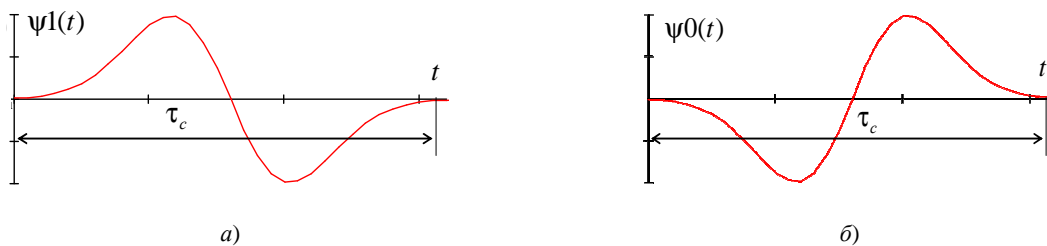


Рис. 2. Элементы вейвлет-сигнала:
а – логической единицы; б – логического нуля

Следует отметить, что свойства локализации вейвлета и его двусторонняя временная структура позволяют на его же основе формировать колебания, которые также можно рассматривать как фрагменты сигнала ФМ-2.

В качестве примера на рисунке 3 показаны фрагменты ФМ-2 сигнала, сформированного на основе элементов синусоид и на основе вейвлетов.

Для оценки помехоустойчивости предложенной ФМ-2 вейвлет-конструкции был определен канал с АБГШ. При эксперименте учитывались следующие обстоятельства. В качестве исходной была определена мощность фрагмента сигнала на основе синусоиды, формируемого квадратурным методом из синфазной и квадратурной составляющих единичной амплитуды. В этом случае амплитуда временной развертки синусоиды составила $\sqrt{2}$. Соответственно, для обеспечения аналогичной мощности у фрагмента, сформированного на основе вейвлета, его амплитуда должна быть повышена до уровня 2,84.

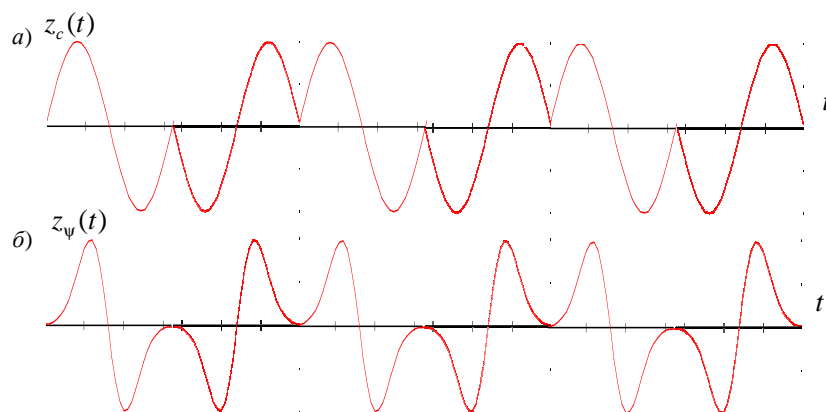


Рис. 3. Сигнал ФМ-2, синтезированный на основе фрагментов:
а – синусоид; б – вейвлетов

На рисунке 4 представлен график зависимости вероятности ошибки на бит P_b от значения отношения мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума (ОСШ) h^2 для сигналов ФМ-2 на основе фрагментов синусоид и вейвлетов, синтезированных в соответствии с предложенным подходом к формированию фазоманипулированных колебаний.

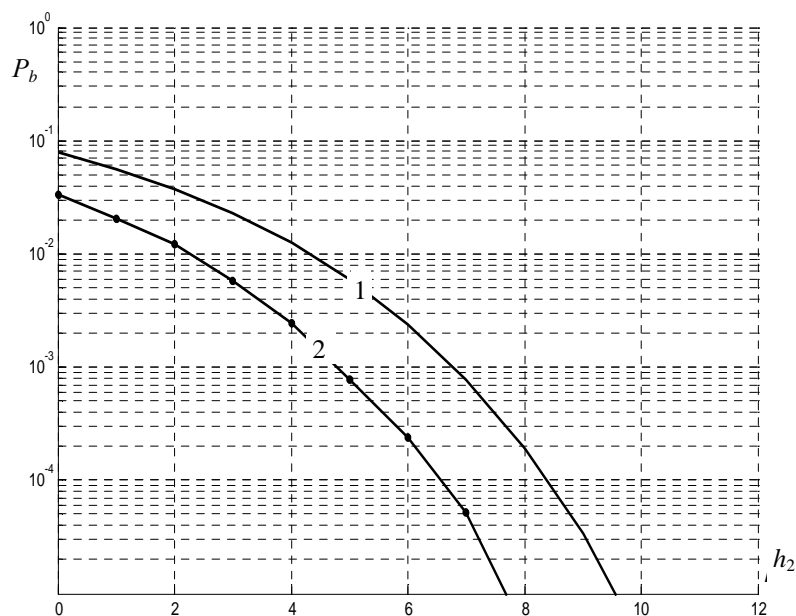


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки на бит от ОСШ при обработке вейвлет-сигнала в базе вейвлет-функций

На рисунке 4 под цифрой 1 показана кривая потенциальной помехоустойчивости для сигнала ФМ-2 в гармоническом базисе, а под цифрой 2 – кривая помехоустойчивости для вейвлет-сигнала, обрабатываемого в базе вейвлет-функций.

Следует заметить, что указанную помехоустойчивость вейвлет-сигналы обеспечат только в том случае, когда на приемном конце корреляционная обработка будет осуществляться в базе вейвлет-функций (т.е. будут обеспечены условия когерентной обработки).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение: при обеспечении требуемой вероятности ошибки на бит $P_b = 10^{-4}$ выигрыш в помехоустойчивости от когерентной обработки в базе вейвлет-функций составит порядка 2 дБ.

Моделирование проводилось в среде MatLab.

Графики строились из условия появления 100 ошибочных решений.

Значение вероятности ошибки на бит рассчитывалось в соответствии с требованиями [1] по формуле:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (2)$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит; N_0 – спектральная плотность мощности шума.

В формуле (2) $Q(x)$ – функция плотности распределения вероятности (площадь под кривой интеграла вероятности):

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt.$$

Таким образом, исходя из полученных результатов можно сделать следующие **выводы**:

- синтез сигналов на основе фрагментов вейвлетов позволяет получить модулированные колебания, помехоустойчивость которых на 2 дБ превосходит потенциально возможные показатели для ФМ-2 сигналов, сформированных в базисе гармонических функций;

- предполагаем, что указанный эффект может быть усилен при увеличении числа различных используемых вейвлетов, применяемых для синтеза итогового сигнала, поскольку в этом случае возрастает сложность обработки таких конструкций. Это обусловливается отсутствием априорной информации о базисах их формирования. Дальнейшие исследования видятся в разработке эффективных методов демодуляции вейвлет-сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Виленкина – Крестенсона / С.Н. Агиевич [и др.] // Контроль-Диагностика. – 2009. – № 3. – С. 52–57.
3. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие / А.Н. Яковлев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

Поступила 03.09.2014

FORMATION OF THE PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS IN WAVELET FUNCTIONS BASISES

**S. DVORNIKOV, A. POGORELOV, S. MANAENKO,
K. KISLICYNA, A. ZHELEZNYAK, S. DVORNIKOV, D. RYABENKO**

The results of investigation of the possibility of formation of phase-shift keyed signals with the help of Gaussian wavelet functions of the first order fragments. Energy parameters of the synthesized wavelet signals are substantiated and their noise immunity is analyzed. Modulated vibrations which noise immunity potentially exceeds the possible values of PM-2 signals formed in harmonic functions basis are received. This effect can be enhanced by increasing the number of different used wavelets which are used for synthesis of the final signal.