

Структурная скрытность сигналов, формируемых в базисе вейлет-функций

Structural Concealment of Signals Shaped in the Basis of Wavelet Functions

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Сергеевич

(dvornikov_s_s@mail.ru)

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

МО РФ, лаборант.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: базисные функции – basis functions; манипуляционные форматы – manipulative formats; вейлет-функции – wavelet-functions; фазоманипулированные сигналы – phase manipulated signals; помехоустойчивость – immunity to interference; скрытность сигналов – signal concealment.

В данной работе представлены результаты исследования возможности использования сигналов, формируемых в базисе вейлет-функций (БВФ). БВФ предлагается формировать из производных различных порядков функции Гаусса. Применение БВФ позволяет получать сигналы с новыми свойствами. Сигналы, формируемые в БВФ, обладают структурной скрытностью по отношению к системам мониторинга, использующим для анализа базисы гармонических функций Фурье. Представлены результаты оценки структурной скрытности сигналов, формируемых в БВФ.

The paper presents the results of studying the possibility of using signals formed in the basis of wavelet-functions (WFB). It is suggested to form the WFB using various order derivatives of the Gauss function. Using the WFB enables one to obtain signals featuring new properties. Signals formed in the WFB are structurally concealed from monitoring systems that employ the bases of harmonic Fourier functions for analysis. Results are presented of assessing the structural concealment of signals formed in the WFB.

Введение

Широкое практическое применение в радиотехнике методы вейлет-преобразований получили благодаря работам А. Гроссмана и Ж. Морле, применительно к обработке сейсмических и акустических сигналов [1].

В настоящее время различные алгоритмы на основе вейлет-функций (далее вейвлеты) успешно использу-

ются при распознавании образов, исследовании нестационарных колебаний, синтезе речевых сигналов и других задачах анализа сигналов [2–6].

Между тем вейвлеты все чаще применяются для прямого численного моделирования как иерархический базис, адаптированный для описания динамики сложных нелинейных процессов. В том числе и для синтеза на их основе различных видов сигналов, что обусловлено возможностью создания с их помощью ортогональных конструкций для манипуляционных форматов.

В частности, в [6] предложен синтез фазоманипулированных сигналов, обладающих свойствами повышенной помехоустойчивости по отношению к их классическим формам на основе гармонических функций.

Таким образом, открываются новые направления применения вейвлетов в качестве сигналов для систем радиосвязи. Именно исследованию данного вопроса посвящена настоящая статья. При этом особый интерес данное направление имеет для систем радиосвязи, стремящихся обеспечить скрытность своей работы по отношению к несанкционированному мониторингу. Можно отметить, что обработка вейлет-сигналов в базисах гармонических функций эквивалентна потере в достоверности принимаемой информации в результате повышения отношения сигнал/шум в канале приема. Исследованию данного вопроса и посвящена настоящая статья

Формирование сигналов на основе вейвлетов

В общем случае вейвлеты $\psi(t)$, согласно [3], представляют собой базисные функции, обеспечивающие с помощью целочисленного масштабирования исходного материнского вейвлета реконструкцию пространства $L^2(\mathbf{R})$, в котором они заданы.

Между тем в [2] обосновано, что аналогом частоты для вейвлетов является представление $\psi(2^k t - \tau)$, здесь τ и k – целые числа ($\tau, k \in \mathbf{I}$). Следовательно, посредством масштабных преобразований ($1/2^k$) и временных сдвигов ($\tau/2^k$) можно описать любое функциональное пространство, при этом используя единственный базисный материнский вейвлет $\psi(t)$.

Поскольку норма вейвлет-базиса, согласно [3], представляется как

$$\|\psi(2^k t - \tau)\|_2 = 2^{-k/2} \|\psi(t)\|_2, \quad (1)$$

то при условии, что материнский вейвлет $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ имеет единичную норму, все функции базиса $\{\psi_{\tau k}\}$ вида

$$\psi_{\tau k}(t) = 2^{k/2} \psi(2^k t - \tau), \quad \tau, k \in \mathbf{I}, \quad (2)$$

также нормированы к единице, т.е. $\|\psi_{\tau k}\|_2 = \|\psi\|_2 = 1$.

Таким образом, любой вейвлет из рассматриваемого пространства $\psi \in L^2(\mathbf{R})$ будет ортогональным, если определенное соотношением (2) семейство $\{\psi_{\tau k}\}$ представляет собой ортонормированный базис этого функционального пространства $L^2(\mathbf{R})$, т.е.

$$\langle \psi_{\tau k}, \psi_{l m} \rangle = \delta_{\tau k} \delta_{l m}, \quad (3)$$

и каждая функция f указанного пространства, т.е. $f \in L^2(\mathbf{R})$, может быть представлена в виде ряда

$$f(t) = \sum_{k, \tau=-\infty}^{\infty} c_{k\tau} \psi_{k\tau}(t). \quad (4)$$

В общем случае, согласно [2], условий (3) и (4) недостаточно для определения вейвлета в качестве базисной функции. Строгость выполнения этого условия предполагает существование обратных преобразований. Однако на практике достаточно выполнения свойств устойчивости и, в соответствии с [3], «приблизительной» ортогональности системы разложения.

С указанных позиций для базиса (2) в качестве таких условий выступают свойства адекватности расширения и сдвига исходного вейвлета ($1/2^k, \tau/2^k$), $k, \tau \in \mathbf{I}$ и возможность обратной реконструкции с точностью до постоянного множителя, ограничивающего класс возможных базисных функций. В частности, Фурье образ для базисных вейвлетов должен быть равен нулю в начале координат [1].

Вейвлет, используемый для реконструкций (в дальнейшем для синтеза сигналов), должен удовлетворять условиям базиса Рисса. Согласно которым всегда существуют такие две константы A и B , где $0 < A \leq B < \infty$, для которых соотношение [3]

$$A \|\{c_{k\tau}\}\|_2^2 \leq \left\| \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{k\tau} \psi_{k\tau} \right\|_2^2 \leq B \|\{c_{k\tau}\}\|_2^2, \quad (5)$$

выполняется при любой ограниченной и дважды квадратично суммируемой последовательности $\{c_{k\tau}\}$:

$$\|\{c_{k\tau}\}\|_2^2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} |c_{k\tau} \psi_{k\tau}|^2 < \infty. \quad (6)$$

В большинстве практических приложений достаточно выполнение свойств полуортогональности для вейвлета, предусматривающего равенство нулю условия (3). В общем случае, условиям существования вейвлета соответствуют производные высоких порядков от функции Гаусса [3, 5]

$$\psi_m(t) = (-1)^m \partial_t^m \left[\exp(-t^2/2) \right]. \quad (7)$$

Здесь $\partial_t^m = \partial^m[\dots]/\partial t^m$, $m \geq 1$.

Таким образом, функции, синтезируемые на основе выражения (7), являясь вейвлетами, удовлетворяют условиям формирования на их основе базисов. Методология вейвлетов наиболее широкое применение нашла в различных областях обработки сигналов, связанных с решением вопросов фильтрации, анализа, распознавания [1–4]. Однако она не исключает применения вейвлетов и в интересах передачи информации [5, 6].

Предложения по синтезу сигналов на основе вейвлетов

Возможность формирования на основе вейвлетов функциональных базисов (см. формулу 2), открывает широкие возможности, в частности, по синтезу сигналов с принципиально новыми свойствами [6]. Действительно, принцип передачи информации базируется на физические различия радиосигналов соответствующих различным компонентам информационного алфавита. Так, при амплитудной модуляции указанные различия наблюдаются в изменении амплитуды. При частотной модуляции – в номиналах несущих частот, а при фазовой модуляции – соответственно в позициях фазы [7].

Под модуляционным форматом в дальнейшем будем понимать совокупность вида модуляции (манипуляции) и скорости передачи сигнала [8].

Очевидно, что аналогичным образом в процессе модуляции можно использовать вместо несущих колебаний и вейвлеты. При этом следует учитывать, что в отличие от гармоник вейвлеты локализованы не только в частотном, но и во временном пространстве, следовательно их применение оправдано в манипуляционных системах, в которых четко локализован единичный элемент сигнала, передающий информацию.

В первую очередь к таковым следует отнести дискретные частотные и фазовые манипуляционные форматы, когда при каждой смене позиций можно в качестве несущего колебания использовать новый вид вейвлета [5].

В частности, для двухпозиционных форматов (когда для передачи бинарной информации исполь-

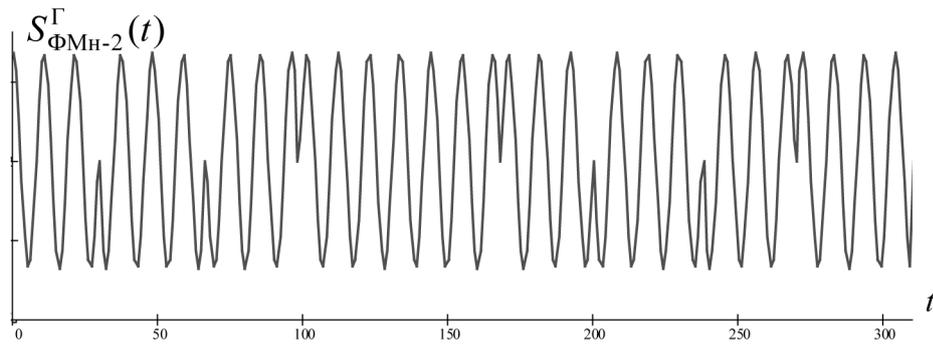


Рис. 1. Временная развертка тестового сигнала ФМн-2 на основе гармоник

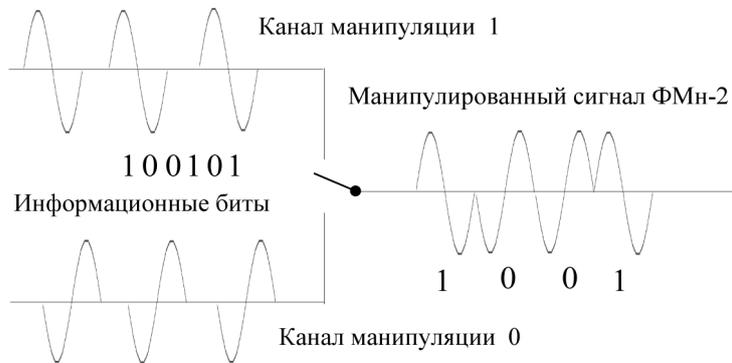


Рис. 2. Синтез сигналов ФМн-2 на основе последовательной коммутации радиоимпульсов

зуют две градации изменения параметра) возможно применение в качестве второго несущего колебания инверсную форму вейвлета и т.д.

Таким образом, вейвлеты, способные формировать функциональные базисы, вполне могут быть использованы для синтеза сигналов частотной и фазовой манипуляции.

В настоящее время одним из наиболее помехоустойчивых видов манипуляционных форматов является двойная фазовая манипуляция (ФМн-2) [7]. Принцип ее реализации состоит в инверсии фазы при смене позиции.

Так, на рис. 1 показана временная диаграмма тестового сигнала ФМн-2 длительностью в 312 дискретных отчета (здесь и далее верхний индекс указывает на базис формирования сигнала, на рис. 1 символ Γ обозначает гармонический базис формирования).

Между тем анализ структуры сигнала ФМн-2 показывает, что он представляет собой совокупность повторяющихся радиоимпульсов с одинаковой частотой заполнения, но различным значением начальной фазы. Таким образом, искомый радиосигнал ФМн-2 представляет собой результат конкатенации ради-

оимпульсов, начальная фаза которых определяется информационным значением битовой посылки.

В соответствии с рассмотренным подходом систему синтеза сигнала ФМн-2 можно представить ключевой схемой, представленной на рис. 2, в которой битовая последовательность регулирует подачу радиоимпульсов в канал. При таком подходе длительность посылок будет определяться скоростью манипуляции ключа.

Рассмотрим основные процедуры указанного синтеза. Поскольку при фазовой манипуляции скорость передачи определяется минимальной длительностью элемента сигнала τ_c , в пределах которого его фаза остается постоянной, то для модели, состоящей из совокупности повторяющихся радиоимпульсов, начальные фазы которых соответствуют значениям логических нулей и единиц, предлагается вначале определить их длительности.

Затем на первом этапе формируются непосредственно элементы сигнала $s_1(t)$ и $s_0(t)$, соответствующие логическим единице и нулю (см. рис. 3).

На втором этапе, согласно информационной последовательности, из сформированных элементов сигнала и

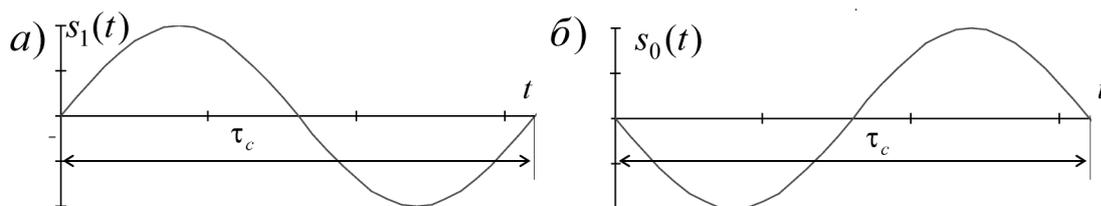


Рис. 3. Элементы сигнала ФМн-2, соответствующие: а – логической единице; б – логическому нулю

синтезируется требуемая модуляционная конструкция (результатирующий ФМн сигнал).

Элементы сигнала, представленные на рис. 3, подобрались таким образом, что на длительности посылки укладывается строго один период колебания. Отметим, что результирующий сигнал, сформированный указанным выше образом, по своим свойствам ничем не будет отличаться от сигнала, синтез которого сводится к инверсии фазы высокочастотного колебания.

Рассмотренный подход открывает возможности по синтезу ФМн-2 сигналов на основе импульсных фрагментов произвольного наполнения, в частности, вейвлетов. Действительно, если в качестве элементов сигнала и определить соответствующие структуры вейвлетов, то в результате получится вейвлет-фазоманипулированное (ВФМ) колебание.

В качестве формирующего предлагается определить так называемый вейвлет Гаусса первого порядка, представляющий первую производную от функции Гаусса (см. формулу 7) [3]. Аналитически вейвлет Гаусса первого порядка будет описываться следующим выражением:

$$\psi(t) = -t \exp(-t^2 / 2). \quad (8)$$

Анализ выражения (8) указывает на локализованный характер функции, т.е. синтез непрерывного колебания на его основе в принципе невозможен. Однако вейвлет Гаусса может быть использован в качестве фрагмента для синтеза манипулированного (формирующего) колебания, в соответствии с рассмотренным выше подходом.

Так, на рис. 4 представлены формирующие сигналы $\psi_1(t)$ и $\psi_0(t)$, синтезированные на основе вейвлета Гаусса.

Отметим, что свойства локализации вейвлета и его двусторонняя временная структура в полной мере отвечает свойствам формирующих колебаний в соответствии с рассмотренным выше подходом.

На рис. 5 показаны фрагменты фазоманипулированных сигналов, сформированных на основе элементов синусоид и на основе вейвлетов.

Таким образом, подход к синтезу фазоманипулированных сигналов на основе последовательной конкате-

нации фрагментов радиоимпульсов с соответствующей начальной фазой, позволил разработать ВФМ сигналы, в основе которых лежат вейвлеты прямой и инверсной структуры [5]. В общем случае, ключевая схема, представленная на рис. 5, может быть расширена до любого числа градаций фаз. В этом случае потребуются пары вейвлетов различных порядков. Например, для синтеза ВФМ-4 сигналов необходимо будет задействовать вейвлеты Гаусса 1-го и 2-го порядка и их инверсные формы.

В радиотехнике, наряду с фазоманипулированными сигналами широко используются и сигналы частотной манипуляции. Прежде всего, это объясняется относительно простотой реализацией процедур их синтеза и обработки, а также не критичностью к системам синхронизации. При этом наибольшее распространение получила двойная частотная манипуляция (ЧМн-2).

Сущность систем передачи с частотной манипуляцией состоит в спектральном различии манипулированных колебаний, передающих информационные биты на равных тактовых интервалах [8].

В частности, на рис. 6а показана временная диаграмма двух колебаний, формирующих сигнал ЧМн-2. Очевидно, что для сигналов ЧМн-2 помехоустойчивость определяется, в том числе, и частотным разносом между несущими $\Delta F = f_1 - f_0$ (см. рис. 6б).

Между тем, аналогичные различия в частотных и временных параметрах можно обеспечить и для фрагментов вейвлетов, являющихся производными функции Гаусса (см. формулу 7).

В частности, на рис. 7а показана временная диаграмма двух колебаний, формирующих сигнал ЧМн-2, на основе 1-й и 5-й производных функции Гаусса (7), а на рис. 7б показаны их спектры.

Следует отметить, что по своей природе сигналы ЧМн-2 представляют собой колебания, частота которых изменяется в зависимости от информационных битов. С другой стороны частотно-манипулированные сигналы можно рассматривать как упорядоченную последовательность импульсов с различной частотой, соединенных между собой путем конкатенации, т.е. по аналогии с рассмотренным синтезом фазоманипулированных сигналов [5].

В этом случае формирование сигналов ЧМн-2 можно реализовать в соответствии со схемой, аналогичной

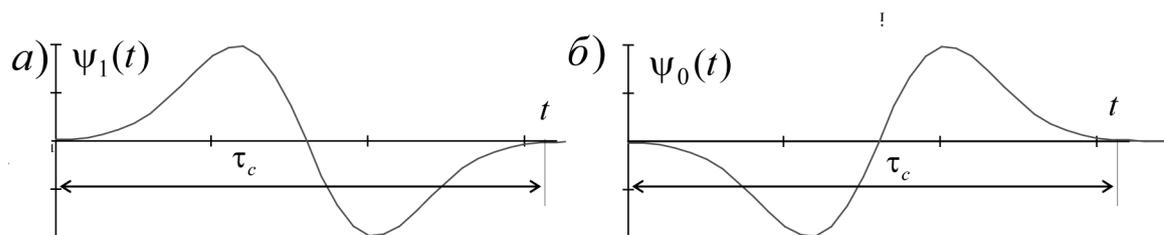


Рис. 4. Формирующие элементы для синтеза вейлет-фазоманипулированного сигнала:
а – логической единицы; б – логического нуля

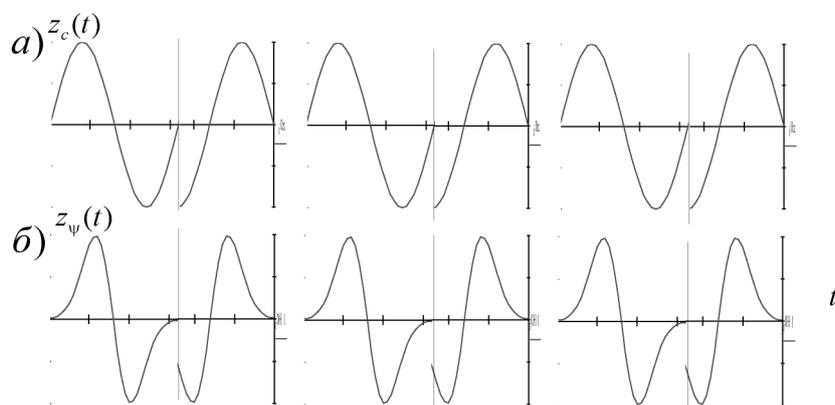


Рис. 5. Сигнал фазовой манипуляции, синтезированный на основе фрагментов:
а – синусоид; б – вейвлетов

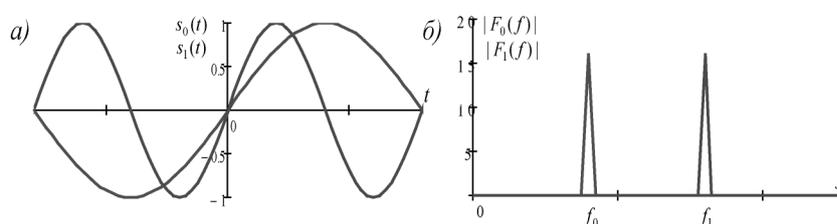


Рис. 6. Компоненты сигнала ЧМ-2 на основе гармонических колебаний:
а – временные; б – частотные

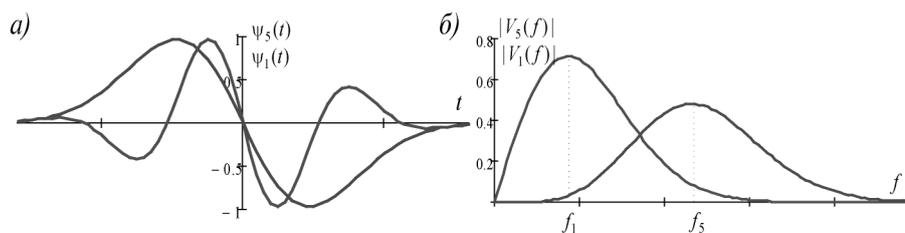


Рис. 7. Компоненты сигнала ЧМн-2 на основе вейвлетов Гаусса 1-го и 5-го порядков: а – временные; б – частотные

на рис. 2, только в этом случае в качестве формирующих будут выступать радиоимпульсы с различным частотным наполнением (см. рис. 8). Действительно, для синтеза вейвлет-сигналов достаточно в схеме на рис. 8 в каналах манипуляции разместить фрагменты производных от функции Гаусса (см. рис. 2а). В результате получается вейвлет-сигнал (см. рис. 9а), аналогичный по своим свойствам и информативности сигналу ЧМн-2 (см. рис. 4б).

В общем случае, в качестве исходных формирующих фрагментов для синтеза вейвлет-сигналов ЧМн-2, которые определим как вейвлет частотно-манипулированные (ВЧМ) колебания могут выступать функции, рассчитываемые согласно выражению (7) при различных значениях m .

Необходимо отметить, что такой подход использован в [6], где формируемые подобный образом сигналы рассматривались в качестве альтернативы фазоманипулированным сигналам. Однако для ВФМ сигналов целесообразно использовать инверсные формы исходных вейвлетов.

Проведенный анализ спектров вейвлетов Гаусса различных порядков, синтезированных на основе выражения (7), показывает, что увеличение порядка дифференцирования функции Гаусса, т.е. увеличение значения m , ведет к смещению максимума спектральной плотности на частотной оси при сохранении значимой полосы частот, необходимой для отображения вейвлета. Так, на рис. 10 показаны функции огибающих спектров вейвлетов, полученных на основе формулы (7) при различных значениях m .

Полученный результат обусловлен следующим. Неизменность ширины значимой полосы частот объясняется сохранением значимой длительности формируемой функции при различных значениях m [7]. В то же время, повышение степени дифференцирования ведет к увеличению числа осцилляций в синтезируемом вейвлете, что равносильно увеличению частоты заполнения одиночного импульса. Именно этот факт и выступает в качестве основного аргумента при определении вида манипуляции как частотной для нового класса вейвлет-сигналов.

Таким образом, чем больше разница в значениях m формирующих вейвлетов, тем шире занимаемая полоса

частот, и, следовательно, больше база. В качестве примера на рис. 11 показан фрагмент сигнала ВЧМ-2, синтезированного на основе вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$.

В ходе моделирования было установлено, что использование базисов вейвлетов при $m = 1$ и $m = 8$ для синтеза тестового сигнала ВЧМ-2 ведет к увеличению базы в 4,9 раза по отношению к гармоническому базису и в 1,4 раза по отношению к вейвлет-базису при $m = 2$. На рис. 12 показаны спектры сигнала ЧМн-2 (удвоенное значение частоты между поднесущими) и ВЧМ-2 сигналов, сформированного на основе производных функции Гаусса 1-го и 8-го порядков (с увеличением порядка ширина спектра возрастает).

Таким образом, представление синтеза частотно-манипулированных сигналов как последовательной конкатенации фрагментов радиоимпульсов позволило разработать модель формирования вейвлет-частотно-манипулированных сигналов с заданными свойствами.

Оценка эффективности разработанных подходов по показателю структурной скрытности сигналов

Важной особенностью предлагаемых сигналов является их структурная скрытность по отношению к системам мониторинга, обрабатывающих радиоизлучения в базисах экспоненциальных функций.

Прежде всего, это объясняется структурой ВФМ и ВЧМ сигналов, в основе которых лежат вейвлеты Гаусса различных порядков.

Так, на рис. 13а представлены фрагменты формирующих сигналов на основе синусоиды $s_0(t)$ и вейвлета Гаусса 1-го порядка $\psi_1(t)$ равной энергии, а на рис. 13б, соответствующие им модули спектров $|F_0(f)|$ и $|V_1(f)|$.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующий вывод: при равной временной длительности, синусоида имеет более компактный спектр по отношению к гауссиану. В случае наличия шумов канала визуальный анализ не позволит однозначно определить вид формирующего сигнала [8]. Поэтому, при отсутствии априорной информации о базисе формирования сигнала, система мониторинга будет проводить анализ в эффективной полосе приема, включающей не менее 90–95% спектральной энергии

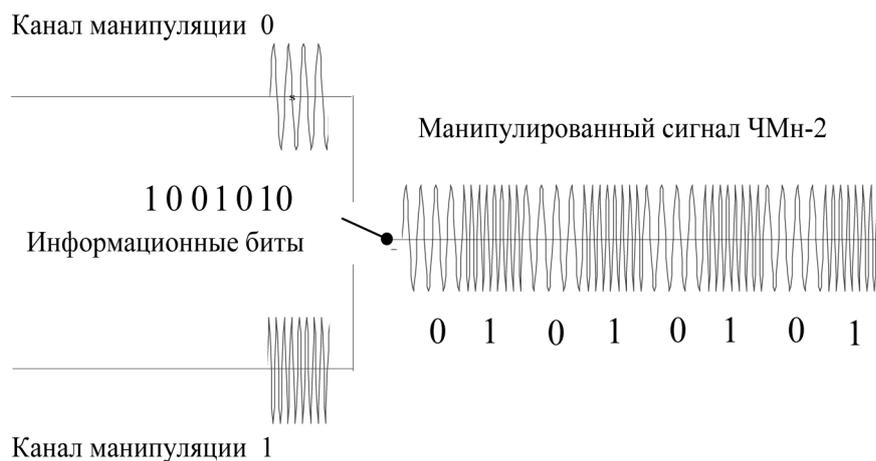


Рис. 8. Принцип формирования сигналов ЧМн-2 коммутацией радиоимпульсов

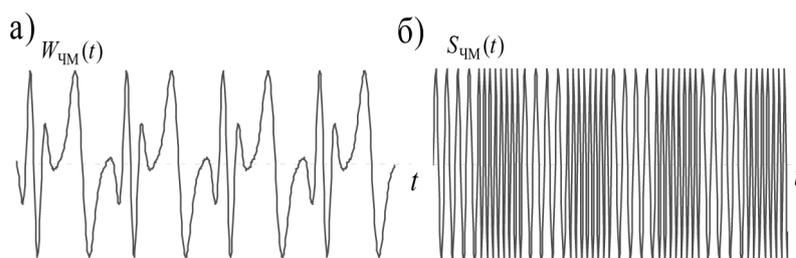


Рис. 9. Временная развертка частотно-манипулированных сигналов на основе:
а – вейвлетов; б – гармонических колебаний

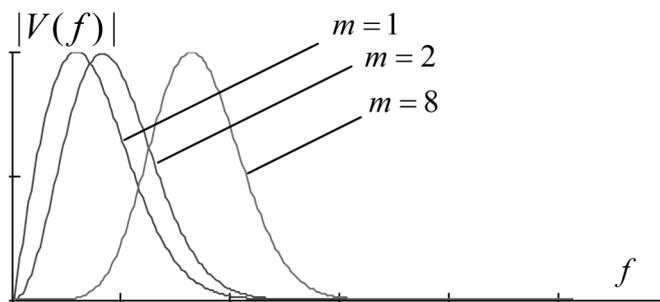


Рис. 10. Функции огибающих спектров вейвлетов при различных значениях m

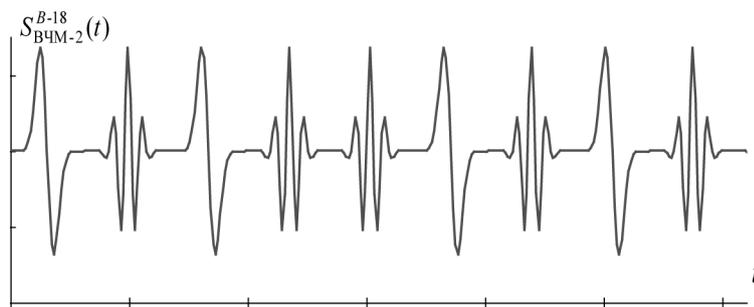


Рис. 11. Временная развертка тестового сигнала ВЧМ-2 на основе вейвлетов 1-го и 8-го порядков

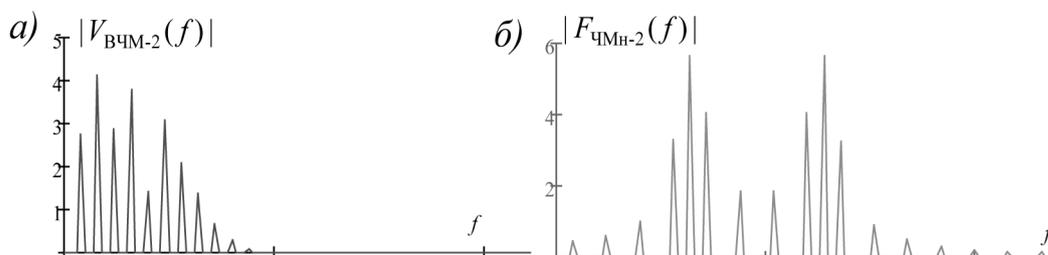


Рис. 12. Спектры сигнала ВЧМ-2 на основе а – вейвлетов; б – гармонических колебаний

в соответствии со скоростью передачи сообщений, в базисе экспоненциальных функций. В этом случае в полосе, оптимальной для обработки, будет сосредоточено менее 70% спектральной энергии формирующих сигналов, в основе которых лежат вейвлеты Гаусса 1-го порядка (см. рис. 14). Таким образом, тракт приема оптимально согласованный с сигналами, сформированными в базисе Фурье, будет неоптимальным для приема вейвлет-сигналов. В свою очередь, неоптимальный прием, согласно [7], приводит или к дополнительному увеличению суммарной мощности шумов, или к уменьшению полезной энергии сигнала. Оба эти эффекта, независимо от природы их возникновения, приводят к снижению достоверности приема.

Действительно, близость частотно-временной структуры сигналов, сформированных в базисе Фурье и вейвлетов, провоцирует при несанкционированном мониторинге использовать традиционные методы гармонического анализа, которые будут неоптимальными по отношению к последним.

Графики на рис. 14 строились в соответствии с формулами:

$$E_s(f) = \sum_s F_0^2(f), \quad (9)$$

$$E_\psi(f) = \sum_f V_1^2(f). \quad (10)$$

Таким образом, близость временной структуры формирующих сигналов при различных законах распределения энергии, определяет их структурную скрытность, которая, согласно [9], характеризует свойство сигналов, затрудняющее эффективную реализацию процедур их обнаружения и измерения параметров, с целью последующего извлечения вложенной информации. Именно благодаря структурной скрытности, системы несанкционированного мониторинга будут вести обработку сигналов, сформированных в базисе вейвлетов, в традиционном базисе функций Фурье [10]. Урон, определяемый структурной скрытностью, можно определить по значению вероятности битовой ошибки, возникающей из-за ошибочного выбора базиса обработки. Так, значение вероятности ошибки на бит для сигналов двойной фазовой манипуляции может быть рассчитано по формуле:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (11)$$

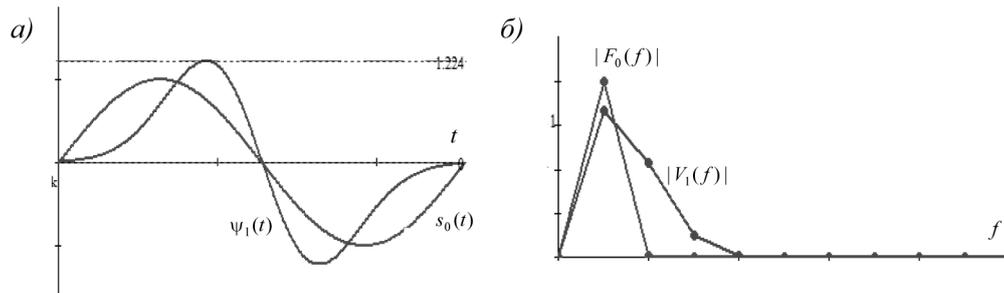


Рис. 13. Формирующие сигналы на основе синусоиды и вейвлета Гаусса:
а – временное представление; б – частотное представление

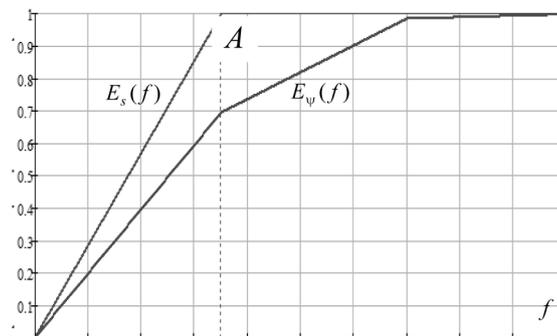


Рис. 14. Распределение энергии формирующих сигналов на основе синусоиды и вейвлета Гаусса
в частотном пространстве

где E_b – энергия, приходящаяся на бит; N_0 – спектральная плотность мощности шума. В формуле (11) $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ – функция плотности распределения вероятности.

В то же время, учитывая, что обработка вейвлет-сигналов в базисе функций Фурье приведет к снижению энергии на 30% (см. рис. 14), что равносильно преобразованию формулы 11 к виду:

$$P_{B\text{ФМн}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \times 0,7\right). \quad (12)$$

Аналогичные рассуждения приводят к соответствующему выражению и для сигналов частотной манипуляции

$$P_{B\text{ЧМн}} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \times 0,7\right). \quad (13)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. При прочих равных условиях,

структурная скрытность нового класса сигналов, сформированных в базисе вейвлетов, обеспечивает увеличение вероятности ошибки при их обработке методами гармонического анализа более чем на два порядка, что равносильно повышению требований к каналу передачи данных более чем на 3 дБ (соответственно точка А на рис. 15а и точка В на рис. 15б).

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующее заключение. Синтез сигналов на основе фрагментов вейвлетов позволяет получить модулированные колебания, которые за счет структурной скрытности обеспечат повышение вероятности ошибки в канале приема средств несанкционированного мониторинга более чем на два порядка, что равносильно снижению их помехоустойчивости на 3 дБ.

Предполагается, что указанный эффект может быть усилен при увеличении числа различных видов используемых вейвлетов, применяемых для синтеза сигналов, поскольку в этом случае возрастает сложность обработки таких конструкций. Следовательно, при несанкци-

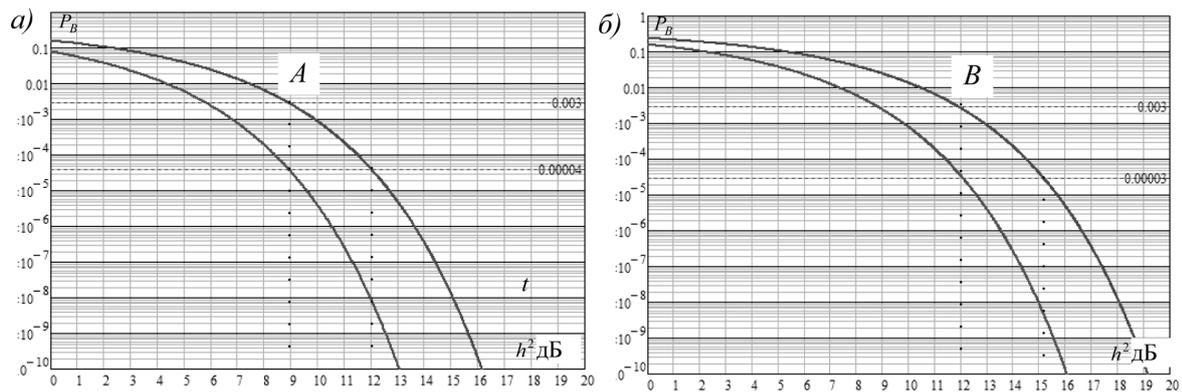


Рис. 15. Оценка эффективности процедур структурной скрытности по показателю вероятности ошибки на бит: а – для сигналов ФМн-2; б – для сигналов ЧМн-2

онированном доступе необходимо будет дополнительно использовать процедуры структурного анализа для определения базиса формирования сигналов. Причем относительная простота выбора базиса позволит его, при необходимости, менять даже в течение одного сеанса.

Дальнейшие исследования видятся в разработке эффективных методов демодуляции вейвлет-сигналов.

Литература

1. Wavelets / eds J.M. Combes, A. Grossmann, P. Tchamitchian. – Berlin: Springer-Verlag, 1989.
2. Rioul, O. Wavelets and signal processing / O. Rioul, M. Vetterli // IEEE Trans. Signal Processing. – Oct. 1991. – Vol. 10. – P. 14–38.
3. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.
4. Способ сжатия графических файлов методами вейвлет-преобразования / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2015. – № 3 (21). – С. 100–106.
5. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов / С.В. Дворников [и др.] // Информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 140–143.
6. Дворников, С. В. Помехоустойчивость фазоманипулированных сигналов на основе вейвлетов Гаусса / С.В. Дворников, С.С. Манаенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 123–125.
7. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
8. Патент 2356064 Российская Федерация, МПК G01S7/00. Способ распознавания радиосигналов / С.В. Дворников [и др.]; патентообладатель: Военная академия связи им. С. М. Буденного; заявл. 24.04.2007; опубл. 20.05.2009. – Бюл. № 14.
9. Каневский, З. М. Теория скрытности / З.М. Каневский, В. П. Литвиненко. – Воронеж.: ВГУ, 1991. – 144 с.

10. Чесноков, М. Н. Структурная скрытность М-ичных широкополосных сигналов детерминированной и случайной структуры / М.Н. Чесноков, Б.С. Каменецкий // Информатика и Космос. – 2012. – № 3–4. – С. 22–28.