

Кроме того, целесообразно для управления использовать сигналы с различным тактовым интервалом на длительности команды, изменяемым случайным образом, или же использовать сигналы сложных конструкций [8].

Направление дальнейшего исследования связано с оперативным решением вопросов обнаружения [9] самого факта деструктивного воздействия структурных помех на радиоканалы.

Список используемых источников

1. Точиллов Л. Системы управления БЛА [Электронный ресурс] / ISPL.ru: [сайт]. URL: http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html, свободный.
2. Орошук И.М. Оценка имитостойкости радиоканала с замираниями при использовании сигналов с частотной манипуляцией // Радиотехника. 2004. № 11. С. 12–18.
3. Дворников С.В., Погорелов А.А., Вознюк М.А., Иванов Р.В. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32–35.
4. Дворников С.В., Кузнецов Д.А., Кожевников Д.А., Пшеничников А.В., Манаенко С.С. Теоретическое обоснование синтеза ансамбля биортогональных сигналов с повышенной помехоустойчивостью // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5 (22). С. 16–20.
5. Дворников С.В., Устинов А.А., Пшеничников А.В., Борисов В.В., Москалец А.Г., Бурькин Д.А. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2013. № 2. С. 90–97.
6. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972. 360 с.
7. Дворников С.В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге // Мобильные системы. 2007. № 4. С. 33–35.
8. Агиевич С.Н., Дворников С.В., Гусельников А.С. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина – Кристенсона // Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 52–57.
9. Дворников С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // Научное приборостроение. 2004. Т. 14. № 4. С. 92–97.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОНКАТЕНАЦИИ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИЙ

С.С. Дворников, А.В. Пшеничников

В работе представлены результаты исследования возможности использования в системах радиосвязи сигналов, формируемых в базисе вейвлет-функций (БВФ). Сигналы, сформированные в БВФ, наделяются свойством структурной скрытности по отношению к базисам гармонических функций. Представленные результаты моделирования подтверждают данное заключение. В статье обоснован подход к синтезу сигналом методом последовательной конкатенации вейвлетов различной структуры, соответствующих информационным символам.

Ключевые слова: базисные функции, манипуляционные форматы, вейвлет-функции, фазоманипулированные сигналы, помехоустойчивость, скрытность сигналов.

PROPOSALS FOR THE FORMATION OF SIGNAL BY A SERIAL CONCATENATION OF WAVELET FUNCTIONS

Dvornikov S., Pshenichnikov A.

The paper presents the results of a study the possibility of using radio signals systems formed in the basis of wavelet functions (WBF). The signals generated in the WBF, endowed with the property of structural secrecy with respect to the bases of the harmonic functions. Presented simulation results confirm this conclusion. In the article the approach to the synthesis of sequential concatenation of wavelets with different structures by signal corresponding to the information symbols.

Keywords: basic functions, handling formats, wavelet function, phase-shift keyed signals, noise immunity, secrecy signals.

Вейвлеты все чаще применяются для синтеза на их основе различных видов сигналов. В частности, в [1, 2] предложен синтез различных форм фазоманипулированных сигналов на основе вейвлетов. Таким образом, открываются новые направления практического применения вейвлетов для формирования на их основе радиосигналов.

Действительно, принцип передачи информации базируется на физические различия радиосигналов, соответствующих различным компонентам информационного алфавита. При амплитудной модуляции указанные различия наблюдаются в изменении амплитуды, при частотной модуляции – в номиналах несущих частот, а при фазовой модуляции – соответственно в позициях фазы [3]. В настоящее время одним из наиболее помехоустойчивых видов манипуляционных форматов является двойная фазовая манипуляция (ФМн-2). Принцип ее реализации состоит в инверсии фазы при смене информационных символов. Так на рисунке 1 показана временная диаграмма тестового сигнала ФМн-2 длительностью в 312 дискретных отчета (здесь и далее верхний индекс указывает на базис формирования сигнала, на рисунке 1 символ Γ обозначает гармонический базис формирования).

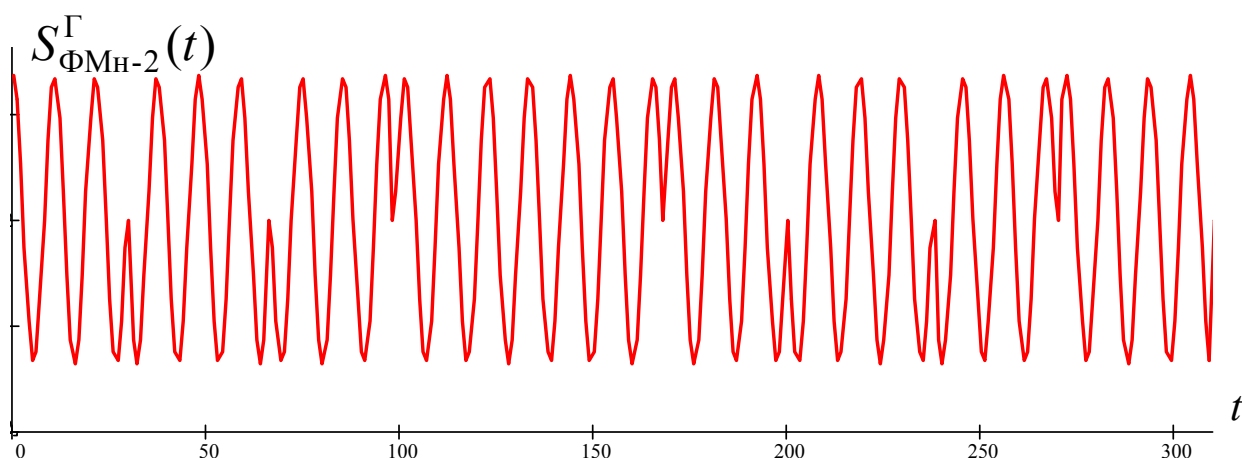


Рис. 1. Временная развертка тестового сигнала ФМн-2 на основе гармоник

Анализ структуры сигнала ФМн-2 показывает, что он представляет собой результат конкатенации радиоимпульсов, начальная фаза которых определяется информационным значением битовой посылки. Следовательно, синтез сигналов ФМн-2 можно осуществлять посредством ключевой схемы, представленной на рисунке 2, в которой битовая последовательность регулирует подачу радиоимпульсов в канал. При таком подходе длительность посылок будет определяться скоростью манипуляции ключа.

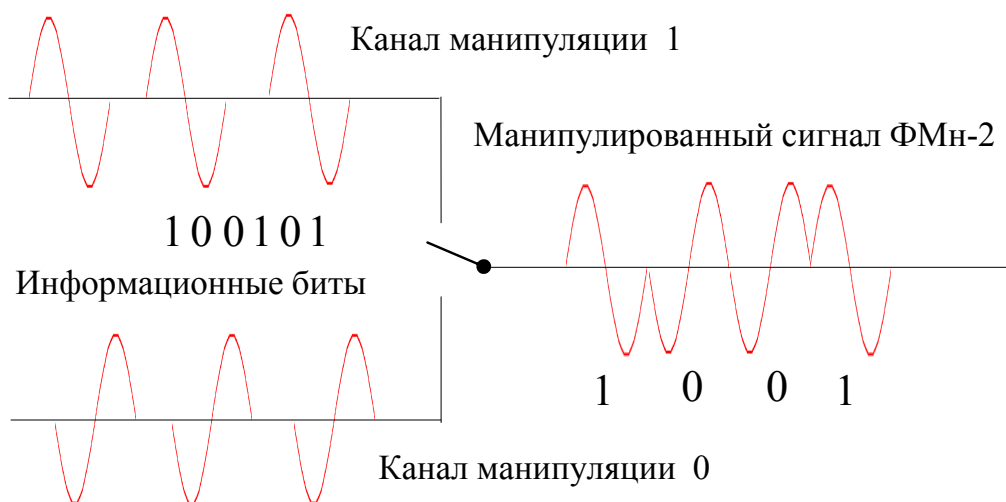


Рис. 2. Принцип формирования сигналов ФМн-2 на основе последовательной конкатенации радиоимпульсов

Рассмотренный подход открывает возможности по синтезу ФМн-2 сигналов на основе вейвлетов, если в качестве формирующих радиоимпульсов определить инверсные формы вейвлетов. В результате получим вейвлет-фазоманипулированное (ВФМ) колебание.

Предлагается в качестве формирующего использовать вейвлет Гаусса первого порядка $\psi(t)$, представляющий производную от функции Гаусса:

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

Аналитически вейвлет Гаусса 1-го порядка имеет следующий вид [1]:

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

Анализ выражения (2) указывает на локализованный характер функции. Следовательно, синтез непрерывного колебания на его основе в принципе невозможен. Однако вейвлет Гаусса может быть в качестве формирующего колебания в ключевой схеме (см. рис. 2). Так, на рисунке 3 представлены формирующие сигналы $\psi_1(t)$ и $\psi_0(t)$, синтезированные на основе прямой и обратной формы вейвлета Гаусса.

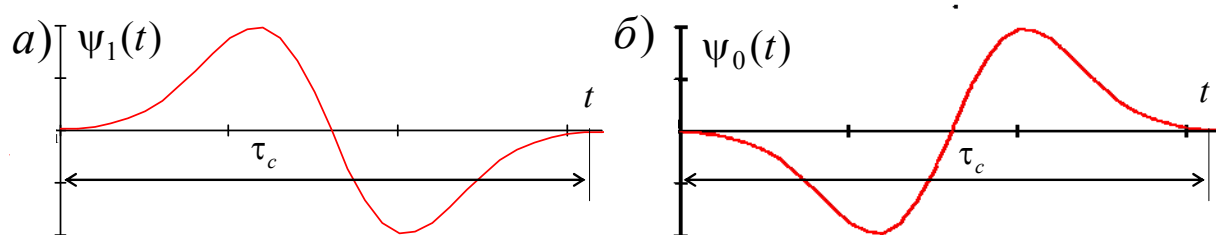


Рис. 3. Формирующие элементы для синтеза ВФМ сигнала:
a – логической единицы; *b* – логического нуля

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

На рисунке 4 показаны фрагменты фазоманипулированных сигналов, сформированных на основе элементов синусоид и на основе вейвлетов.

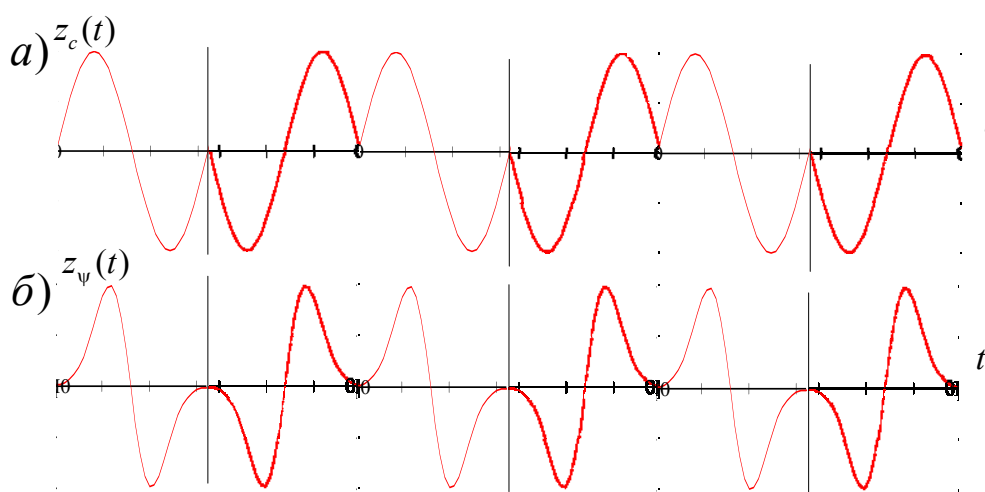


Рис. 4. Сигнал фазовой манипуляции, синтезированный на основе фрагментов:
a – синусоид; *b* – вейвлетов

Таким образом, подход к синтезу ФМн-2 сигналов на основе последовательной конкатенации фрагментов радиоимпульсов, позволил разработать метод формирования ВФМ сигналов, в основе которых лежат вейвлеты прямой и инверсной структуры.

Важной особенностью предлагаемых сигналов является их структурная скрытность по отношению к системам мониторинга [4], обрабатывающих радиоизлучения в базисах гармонических функций. Это объясняется структурой ВФМ сигналов, в основе которых лежат вейвлеты Гаусса.

Так, на рисунке 5*a* представлены фрагменты формирующих сигналов на основе синусоиды $s_0(t)$ и вейвлета Гаусса 1-го порядка $\psi_1(t)$ равной энергии, а на рис. 5*b*, соответствующие им модули спектров $|F_0(f)|$ и $|V_1(f)|$.

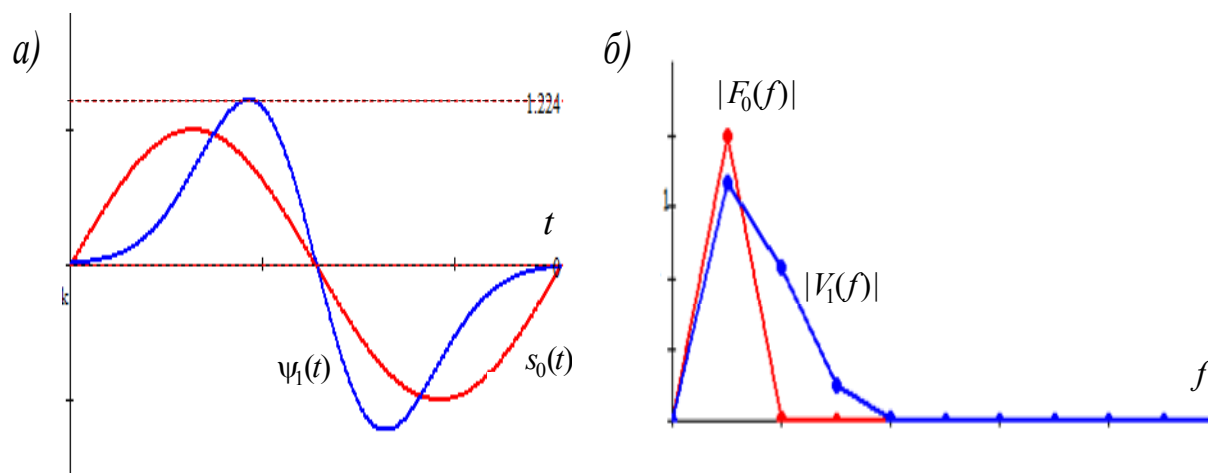


Рис. 5. Формирующие сигналы на основе синусоиды и вейвлета Гаусса:
 а – временное представление; б – частотное представление

На рисунке 6 приведено распределение энергии формирующих сигналов в частотном пространстве.

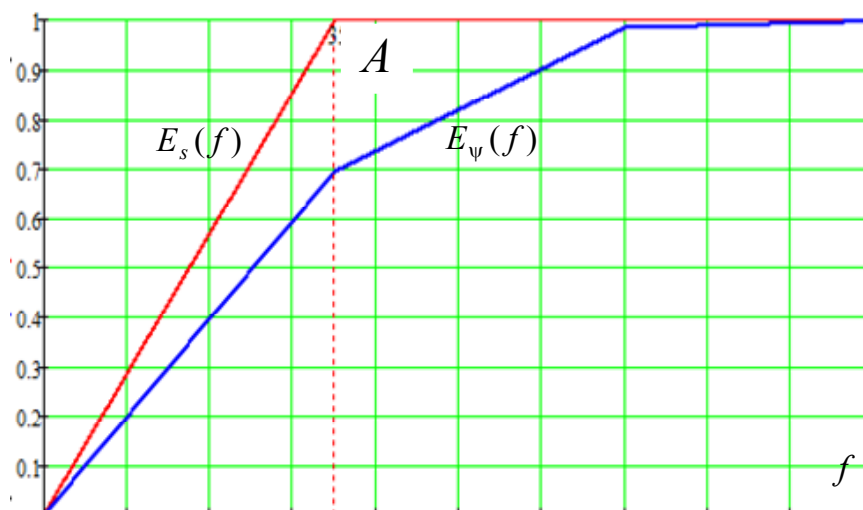


Рис. 6. Распределение энергии формирующих сигналов на основе синусоиды и вейвлета Гаусса в частотном пространстве

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. Обработка вейвлет-сигналов в базисе функций Фурье является неоптимальной и эквивалентна снижению энергии на 30 % (см. рис. 5). Аналитически это равносильно добавлению в формуле вероятностной оценки помехоустойчивости коэффициента 0,7 [3]:

$$P_{\text{ВФМН}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \times 0,7\right). \quad (3)$$

Полученный результат можно интерпретировать как снижения помехоустойчивости вследствие структурного несоответствия гармоник и вейвлетов в частотно-временном пространстве. Указанные различия определим, как структурную скрытность, характеризуемую показателем увеличения вероятности ошибки на бит (см. рис. 7).

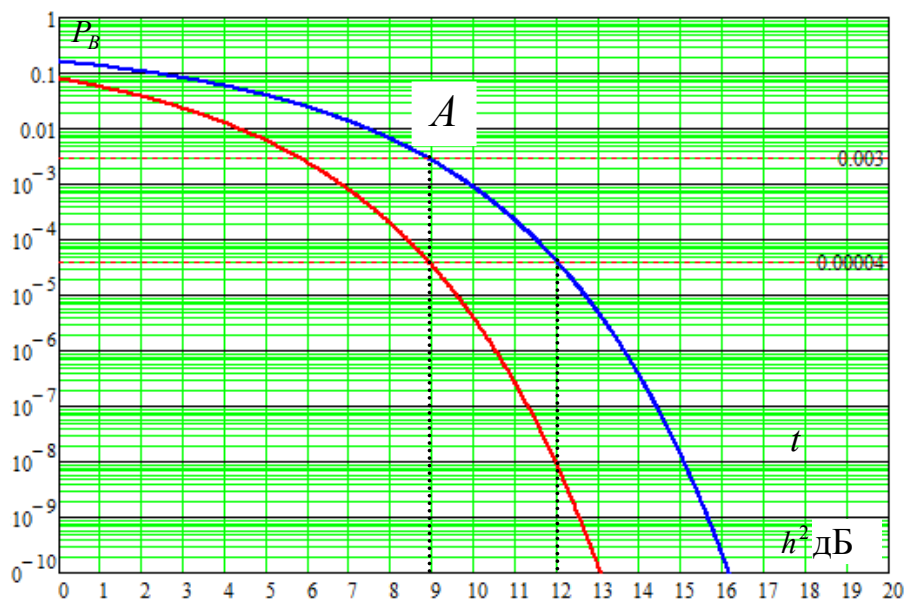


Рис. 7. Оценка эффективности процедур структурной скрытности по показателю вероятности ошибки на бит: – для сигналов ФМн-2

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее заключение. При отсутствии априорной информации о базисе формирования сигнала, система мониторинга будет проводить анализ в эффективной полосе приема, включающей не менее 90–95 % спектральной энергии в соответствии со скоростью передачи сообщений, в базисе гармонических функций. В этом случае, в полосе, оптимальной для обработки, будет сосредоточено менее 70 % спектральной энергии ВФМ сигналов, в основе которых лежат вейвлеты Гаусса 1-го порядка. Это ведет к увеличению вероятности ошибки более чем на два порядка, что равносильно снижению отношения сигнал шум в канале более чем на 3 дБ.

Предполагается, что указанный эффект может быть усилен при увеличении числа различных видов, используемых вейвлетов, применяемых для синтеза ВФМ сигналов. Поскольку в этом случае возрастает сложность обработки таких конструкций, обусловленная отсутствием априорной информации о базисах их формирования.

Дальнейшие исследования видятся в разработке эффективных методов демодуляции вейвлет-сигналов. А также решения задачи распознавания ВФМ на основе подхода, предложенного в [5], основу которого составляют процедуры вейвлет-преобразований обрабатываемых излучений.

Список используемых источников

1. Дворников С.В., Дворников С.С., Манаенко С.С., Погорелов А.А. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов // Информационные технологии. 2015. № 2. С. 140–143.
2. Дворников С.В., Манаенко С.С. Помехоустойчивость фазоманипулированных сигналов на основе вейвлетов Гаусса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 123–125.
3. Прокис Дж. Цифровая связь / пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
4. Дворников С.В., Дворников С.С., Манаенко С.С., Пшеничников А.В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 87–93.
5. Устинов А.А., Дворников С.В., Дворников С.С., Коноплев М.А., Сухаруков Г.А., Осадчий А.И. Способ распознавания радиосигналов. Пат. на изобретение RUS 2430417 25.05.2010.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

А.С. Дюбов, Т.Р. Ялунина

В связи с внедрением систем спектрального уплотнения и увеличением требуемой мощности передаваемого сигнала, достигающей уже 30 дБм, влияние нелинейностей оптических волокон становится существенным: их проявление на таких высоких мощностях вносят значительные искажения в передаваемый сигнал, тем самым, снижая достоверность и ограничивая длину регенерационного участка. Проводить экспериментальные исследования нелинейностей затруднительно, что обусловлено одновременным проявлением нескольких эффектов и необходимостью применения сложных и дорогостоящих приборов. Компьютерное моделирование упрощает процесс исследований, расширяя возможности исследования оптических систем связи.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, оптическое волокно, нелинейные эффекты, четырехволновое смешение, DWDM.

COMPUTER MODELING OF NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS

Dyubov A., Yalunina T.

In connection with the introduction of WDM systems and the increase in the required power of the transmitted signal, which reaches over 30 dBm, the influence of nonlinear optical fibers becomes significant: their appearance on the high power of making a significant distortion in the transmitted signal, thereby reducing the reliability and limiting the regeneration section length. To conduct experimental studies of nonlinear difficult, due to the simultaneous display of multiple effects and the need to use complex and expensive devices. Computer modeling simplifies the research process, empowering the study of optical communication systems.

Keywords: computer modeling, optical fiber nonlinear effects, four-wave mixing, of DWDM.