

Повышение помехоустойчивости систем связи с OFDM–сигналами с применением вейвлет–преобразования

Е. Н. Рычков^{1,*}, В. Г. Патыков¹, Ю. А. Пирогов²

¹Сибирский федеральный университет, радиотехнический факультет, кафедра радиотехники
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 13.06.2018; Подписана в печать 10.09.2018)

Рассмотрены системы связи с OFDM–сигналами в сравнении с классическими системами связи на базе амплитудной, частотной и фазовой видов модуляций. Исследована возможность использования в данных системах связи вейвлет–преобразования вместо преобразования Фурье. Проведено сравнение принятой приемником системы связи информации для случаев с вейвлет– и Фурье–базисами. Показано, что вейвлет может обеспечить выигрыш в борьбе с селективными частотными замираниями, так как информация в таком сигнале не локализована в частотной области и не размыта во временной. Таким образом, показана возможность создания новых систем связи, где оптимальные параметры системы не распределены по разным алгоритмам, таким как кодирование с перемежением, OQAM–IOTA, FBMC и другим, а сосредоточены в одной функции вейвлет–преобразования.

PACS: 41.20.Jb.

УДК: 621.376.

Ключевые слова: преобразование Фурье, кодирование с перемежением, вейвлет, дискретное вейвлет–преобразование, системы связи с OFDM–сигналами, селективные замирания, системы связи 5-го поколения, OQAM–IOTA, FBMC.

Уже около 20 лет уровня развития аппаратной базы достаточно, чтобы разрабатывать системы связи с OFDM–сигналами (Orthogonal Frequency Division Multiplexing — ортогональное частотное разделение с мультиплексированием) [1, 2] на основе операций преобразования Фурье. Данные системы связи обладают рядом преимуществ перед классическими системами связи, использующими стандартные виды модуляции, а именно: высокая спектральная эффективность, устойчивость к селективным замираниям в многолучевом канале связи, низкая символная скорость, что позволяет справляться с временным рассеянием. Имеется возможность сопоставить OFDM–модуляцию как относительно новый метод модуляции с ее простейшими видами: амплитудной, частотной или фазовой. Если в OFDM–сигналах определенный частичный объем информации сосредоточен в одной из поднесущих частот спектра, то в классических системах связи этот объем информации может быть распределен по всему спектру.

Однако OFDM–технологии присущи и некоторые недостатки: межсимвольная и межчастотная интерференция, чувствительность к частотным и фазовым искажениям, большой пик–фактор сигнала. Сигнал, информация в котором локализована в одной гармонике, является неограниченным во времени согласно принципу размытия сигнала во временной области и его сосредоточенности в области частот. Это приводит к дополнительным искажениям при про-

хождении сигнала через многолучевой канал и при генерации различных частот. Кроме того, на границе OFDM–символов возникают фазовые неоднозначности. Частоты сигнала расплываются по спектру, а любые рассинхронизации в системе связи приводят к увеличению вероятности битовой ошибки. Промежуточное (частотно–временное) решение, отличное как от OFDM–технологии, так и от классических видов модуляции [1–3], позволило бы устранить указанные эффекты.

Изменить степень локализации информации в спектре можно с помощью кодирования с перемежением. Эта технология позволяет добавить в несколько поднесущих частот одну и ту же информацию с разными весами. Но тогда остаются проблемы, связанные с фазовыми неоднозначностями на границах OFDM–символов и с размытием поднесущих частот во временной области.

С другой стороны, существуют решения, улучшающие спектральную эффективность в OFDM–системах связи, работающих на преобразовании Фурье, и подавляющие искажения сигналов за счет уменьшения фазовых скачков и неоднозначностей: Filter Bank Multi Carrier (FBMC, банк цифровых фильтров), Offset Quadrature Amplitude Modulation — Isotropic Orthogonal Transform Algorithm (OQAM–IOTA, изотропный алгоритм преобразования созвездия со сдвигом). Эти алгоритмы используются в системах связи 5-го поколения (5G) и позволяют дополнить классическое представление о достоинствах OFDM–систем теми фактами, что за счет цифровой фильтрации каждой поднесущей можно увеличить спектральную эффективность и уменьшить искажения гармоник. Пре-

*E-mail: eu.rychkov@yahoo.com

образования, отличные от Фурье, позволяют не только сглаживать искажения сигнала и фазовые неоднозначности, но и перейти к принципиально новому направлению формирования систем связи. Информация в таком случае может быть распределена по спектру не так, как в классических системах связи с амплитудной, частотной и фазовой модуляциями, но и не так, как в системах связи с OFDM-сигналами на базе преобразования Фурье. Эту задачу частично решает алгоритм адаптивной подстройки скорости передачи данных на каждой поднесущей. Но данный метод не позволяет уменьшить фазовые и частотные неоднозначности, а также искажения поднесущих частот в OFDM-сигнале.

Вейвлет-преобразование обладает возможностью использовать вместо частотного представления временные коэффициенты масштаба и сдвига. Потенциально это позволяет вместо локализации информации на отдельных поднесущих распределять ее с определенными весовыми коэффициентами по спектральной области. В работах [1–4] рассматривается такая возможность, но только для каналов связи с аддитивным белым гауссовым шумом и шумами Рэля, так что условия и конкретные причины повышения помехоустойчивости за счет применения вейвлет-преобразования практически не были раскрыты.

Рассмотрение вейвлет-преобразования целесообразно начать с замены операций ОДПФ и ДПФ (обратного и прямого дискретных преобразований Фурье) соответственно на операции ОДВП и ДВП (обратное и прямое дискретные вейвлет-преобразования). Информация закладывается в функцию, модуль которой $WT(w)$ представлен на рис. 1.

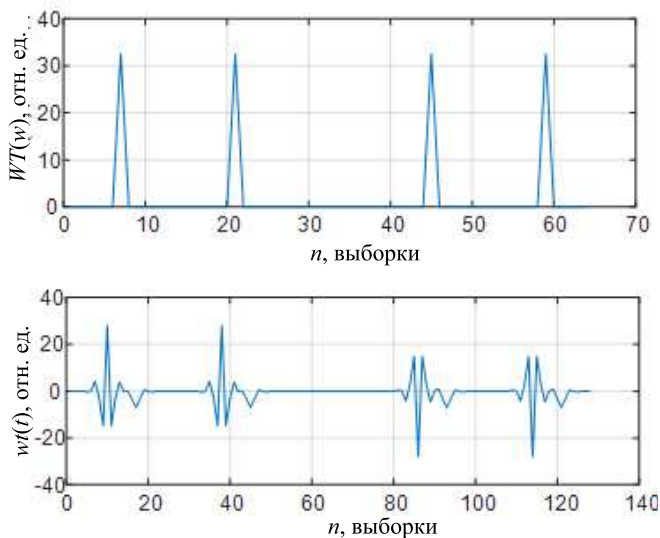


Рис. 1: Модуль временного сигнала $wt(t)$, полученный с помощью операции обратного вейвлет-преобразования спектра сгенерированного сигнала, модулем которого является функция $WT(w)$

С помощью операции обратного вейвлет-преобразования получается временное представление сигнала, модуль которого $wt(t)$ также представлен на рис. 1. В пакете Matlab такое преобразование выполняется строчкой: $wt = ilwt(real(WT), imag(WT), 'bior5.5')$.

Длительность одной поднесущей вейвлет-сигнала в таком случае составляет примерно 12% от длительности всего OFDM-символа. Поэтому можно заметить, что если преимущество в OFDM-системе достигается за счет уменьшения скорости передачи данных на каждой поднесущей частоте, то в системах связи на основе вейвлет-преобразования преимущество следует искать в локализованности по времени. Слово «wavelet» в переводе с английского означает «небольшая волна, рябь». Этот принцип противопоставлен, однако, принципу действия OFDM-систем на базе Фурье-преобразования, где устойчивость к многолучевости проявляется тогда, когда высокий уровень замираний в канале связи подавляет сигнал на некотором промежутке времени, меньшем длительности OFDM-символа, и информация, подвергаясь этим замираниям, восстанавливается. При использовании вейвлет-базиса информация, заложенная в выборках 6–19 временного сигнала $wt(t)$, может быть полностью утрачена, если интерференция лучей даст для этих выборок минимум амплитуды на входе приемной антенны. Напротив, селективные частотные замирания не ухудшают качество передачи данных, так как информация распределена по спектру Фурье. Следовательно, могут существовать и промежуточные варианты, когда информация частично распределена как по спектру, так и во временной области.

Сравнение OFDM-систем с Фурье- и вейвлет-базисами целесообразно начать с рассмотрения спектра, в который добавлена информация в виде случайного сигнала. Добавим число поднесущих частот так, чтобы в итоге получился массив ненулевых выборок $n = 7, 21, 23, 25, 41, 43, 45, 59$. Сгенерированный в комплексном виде сигнал $S1$ представлен на рис. 2. Внизу на том же рисунке дается созвездие сигнала $S1$, в котором используется 4-х позиционная амплитудная модуляция (КАМ-4) [4].

На рис. 2 на созвездии происходят переходы через 0, так как в пакете MATLAB при построении графика все 4 точки созвездия определены информационными поднесущими, а их разделяют нулевые поднесущие. После генерации OFDM-сигнала по правилам Фурье- и вейвлет-преобразований в спектр полученных сигналов добавлено селективное частотное замирание, смоделированное посредством умножения амплитуд выборок спектра OFDM-сигнала с номерами $n = 20 - 30$ на 0.1.

На рис. 3 приведены сигналы, полученные после прохождения OFDM-сигналов на базе Фурье- и вейвлет-преобразований через модель канала связи, в которую шум не добавлялся и рассматривалось исключительно влияние селективных замираний. Цик-

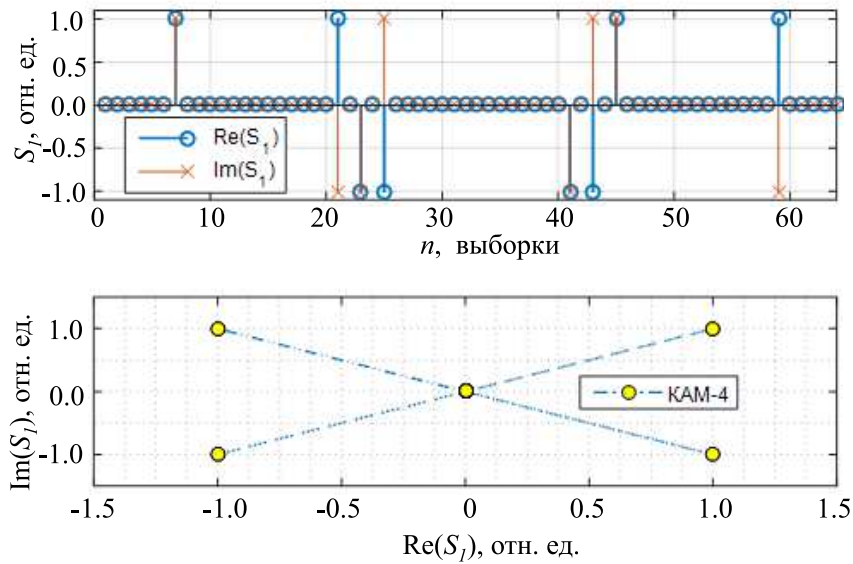


Рис. 2: Комплексный сгенерированный спектр S_1 и его созвездие, полученное при использовании 4-х позиционной амплитудной модуляции

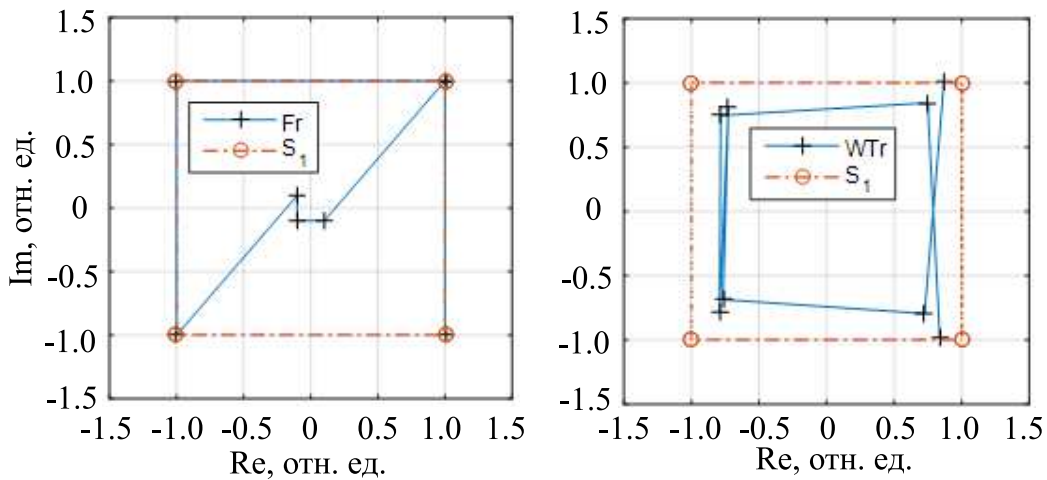


Рис. 3: Слева дано созвездие принятого сигнала при использовании базиса Фурье, справа — то же созвездие при использовании вейвлет-базиса (4-х позиционная амплитудная модуляция)

личный префикс в сигнал также не добавлялся для максимальной простоты моделирования канала связи, ведь в таком случае можно просто подавить гармоники с теми номерами, где находится полезный сигнал.

На рис. 3 приведено сравнение созвездия OFDM сигнала S_1 на входе в канал связи с созвездиями на выходе для случаев модуляции посредством преобразования Фурье (Fr — левый фрагмент рис. 3) и вейвлет-преобразования (WTr на правом фрагменте). Видно, что на левом фрагменте значительная часть информации утеряна. Правый фрагмент показывает, что сигнал по амплитуде уменьшился и несколько возросла вероятность битовой ошибки. Однако WTr -сигнал принят со значительным информационным выигрышем по сравнению с Fr -сигналом, созвездие которого

представлено на левом фрагменте — с применением вейвлет-преобразования созвездие сигнала сохранено практически полностью несмотря на 10-кратное уменьшение его амплитуды за счет селективного замирания.

Таким образом, применение вейвлет-базиса позволяет увеличить устойчивость системы связи к селективным по частоте замираниям в канале связи по сравнению с OFDM-системами, в которых используется преобразование Фурье. Вейвлет-сигнал представляет собой не набор гармоник, которые могут быть бесконечны во времени, а набор ограниченных во времени «малых волн».

При этом появляется возможность гибкой адаптации длительности и спектра сигнала к модели канала связи. Техники кодирования с перемежением, адаптации

скорости связи на поднесущих частотах, IOTA-QAM, FBMC могут быть сведены к использованию одной оп-

тимальной функции преобразования, в которую будут закладываться поправочные коэффициенты.

-
- [1] *Deshmukh A., Bodhe Sh.* International journal of advancements in technology. 2012. **3**, N 2. P. 74.
[2] *Umaria K.N., Joshi K.* 1st International conference on Emerging technology trends in electronics, communication and networking. 2012. P. 1.
[3] *Chen S., Zhao H., Zhang Sh., Yang Yu.* IET Radar Sonar

- Navig. 2014. **8**, N 3. P. 167.
[4] *Рычков Е.Н., Патюков В.Г.* Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2016. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/win/jan16/5/text.pdf>.

The noise immunity increasing of the communication systems with OFDM–signals using the wavelet transform

E. N. Rychkov^{1,a}, V. G. Patyukov¹, Y. A. Pirogov²

¹*Radio engineering department, radio engineering faculty, Siberian federal university
Krasnoyarsk, 660074, Russia*

²*Basic physics department, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aeu.rychkov@yahoo.com

The communication systems with OFDM–signals have been considered in a comparison with the classic communication systems, which are based on amplitude, frequency and phase modulation types. The possibility of usage the wavelet transform instead of Fourier transform in such systems has been investigated. The experiment has been done with a matching of received information in two types of OFDM–systems: with Fourier and wavelet transforms. There has been shown that wavelet-basis can lead to the benefit with a selective fading, so as information in such a signal is not localized in frequency domain, but, on the other hand, is not blurred in the time domain. Thus, the possibility has been demonstrated to build new communication systems, in which the optimal parameters of the system are not distributed in several algorithms, but are concentrated in wavelet transform. Such several algorithms in common OFDM–systems are interleaving coding, OQAM–IOTA, FBMC and others.

PACS: 41.20.Jb.

Keywords: Fourier transform, interleaving coding, wavelet, DWT, communication systems with OFDM–signals, frequency–selectivity, 5G, OQAM–IOTA, FBMC.

Received 13 June 2018.

Сведения об авторах

1. Рычков Евгений Николаевич — аспирант; e-mail: eu.rychkov@yahoo.com.
 2. Патюков Виктор Георгиевич — доктор техн. наук, профессор.
 3. Пирогов Юрий Андреевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: yupi937@gmail.com.
-