

Раздел I. Методы и алгоритмы обработки сигналов

УДК 004.93'12, 004.93'14

В.П. Федосов, Д.Г. Ковтун, А.А. Легин, А.В. Ломакина

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ OFDM-СИГНАЛА С МАЛЫМ УРОВНЕМ ВНЕПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлен процесс формирования и анализ модели OFDM-сигнала с низким уровнем внеполосного излучения, обеспеченного выбором параметров окна приподнятого косинуса и числа поднесущих при формировании защитных интервалов. Для пояснения сущности формирования модели OFDM-сигнала (Orthogonal frequency-division multiplexing, Ортогональное частотное уплотнение), обоснования способа и выявления последствий снижения уровня внеполосного излучения представлено описание процесса формирования модели и источников внеполосного излучения сигнала с учетом многопутности его распространения в канале радиосвязи. Исследование влияния уровня внеполосного излучения в зависимости от длины спада окна типа «приподнятый косинус» по отношению к длительности защитного интервала OFDM-символа выполнено на примере OFDM-символа, имеющего 1024 поднесущих. Из этих поднесущих 400 являются защитными, а оставшиеся 624 поднесущие - информационные. Благодаря защитному интервалу и оконной обработке, широкополосное многопутное замирание представляется в OFDM как ряд узкополосных поднесущих без межсимвольной (Inter Symbol Interference, ISI) и межканальной помех (Inter Carrier Interference, ICI). Единственным остаточным эффектом многопутности является случайная фаза и амплитуда у поднесущей. При исследовании влияния длительности защитного интервала на уровень внеполосного излучения длительность оконной функции выбрано равным длительности циклического префикса, так как это обеспечивает наименьшее внеполосное излучение. При этом длительность префикса выбирается равной 1/128, 1/16, 1/4 соответственно. Анализ результатов показал, что чем длиннее защитный интервал, тем меньше уровень внеполосного излучения. В результате исследований показано, что уровень внеполосного излучения снижается на 15 дБ при расстройке относительно границ полосы частот, отведенной для канала связи, на 0,75 МГц.

Ортогональное частотное уплотнение; OFDM; интерференция; внеполосные излучения; несущая; поднесущие; пилот-сигналы.

V.P. Fedosov, D.G. Kovtun, A.A. Legin, A.V. Lomakina

RESEARCH OF MODEL OFDM-SIGNAL WITH SMALL LEVEL OF OUT-OF-BAND RADIATION

The article presents the process of forming and analysis of OFDM-signal model with low-band radiation, ensure the selection of the parameters of a raised cosine window and the number of subcarriers in the formation of the guard interval. To explain the essence of forming model OFDM-signal (Orthogonal frequency-division multiplexing), justification of the method and identify the effects of lowering of-band radiation is a description of the formation of the model and source of the radiation-band signal based on multipath its distribution channel radio. Research of the influence of the level-of-band radiation as a function of the length of the recession of the window of the "raised cosine" in relation to the duration of the guard interval of the OFDM symbol is made on an example of OFDM-symbol having 1024 subcarriers. Among these 400 subcarriers are protective, and the remaining 624 subcarriers information. Because of the guard interval and window treatment, broadband multipath fading appears in an OFDM as the number of narrow-

band subcarriers freezes without ICI and ISI. Single remainder effect of multipath is the random phase and amplitude at the subcarrier. Investigation of the effect on the duration of the guard interval band emission level duration of the window function is chosen to be the length of the cyclic prefix, since it provides the lowest-band radiation. The duration of the prefix chosen equal 1/128, 1/16, 1/4, respectively. Analysis of the results showed that the longer the guard interval, the lower the out of band radiation. As a result of studies have shown that the level-of-band emission is reduced by 15 dB with respect to the boundaries of the detuning frequency band allocated for the communication channel at 0,75 MHz.

Orthogonal frequency consolidation; OFDM; interference; out-of-band radiation; carrier; subcarriers; pilot-signals.

Введение. В классических системах передачи и обработки данных, стремящихся к достижению все более высоких скоростей передачи, в частотной области применяется параллельная передача данных с помощью деления полного диапазона частот сигнала на N_c неперекрывающихся частотных подканалов (частотное разделение каналов, FDM). Затем каждый подканал или поднесущая модулируются отдельным символом, а потом все подканалы мультиплексируются по частоте. При этом благодаря вставке между смежными подканалами достаточного по длительности защитного интервала, исключается спектральное перекрытие. В этом случае снижается межканальная интерференция (межбитовая интерференция, ICI), уменьшается вероятность битовой ошибки, а значит, повышается пропускная способность системы беспроводного доступа. При этом для более эффективного использования частотного ресурса спектры отдельных подканалов могут частично перекрываться, что приводит к нарушению ортогональности при разделении подканалов в приемнике. Такие взаимовлияния битовых сигналов доставляют множество неудобств. Так, например, система связи на основе OFDM уязвима для смещения несущей частоты и фазового шума. Если гетеродины в передатчике и приемнике не совмещены по частоте, то спектр неверно «дискретизирован» в пиках sinc-функций, а отсчеты по частоте находятся слева или справа от них [1–6]. В этом случае происходит перекрытие полос поднесущих, что приводит к появлению межбитовой интерференции. Аналогично сигнал OFDM уязвим для спектральных продуктов преобразований, вызванных нелинейными усилителями, смещением постоянной составляющей (DC) при использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ) и т.д. Кроме того, искажения, вызванные многопутностью при распространении электромагнитного поля между базовой и мобильной станциями, также доставляют немало проблем при восстановлении переданной информации на приемной стороне.

В статье выполнен анализ модели OFDM-сигнала с низким уровнем внеполосного излучения, обеспеченного выбором параметров окна приподнятого косинуса и числа поднесущих для формирования защитных интервалов.

Постановка задачи. На рис. 1 представлена базовая структура системы с многими несущими [7]. Последовательный поток данных $s(i)$ преобразовывается в параллельный поток данных в разнесенных по частоте отдельных подканалов. Полученные сигналы суммируются и передаются в приемник.

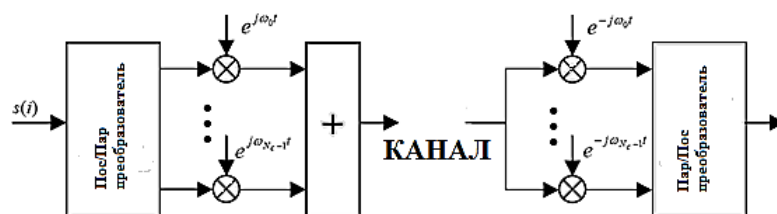


Рис. 1. Базовая структура системы с многими поднесущими

Операция умножения на комплексную экспоненту с соответствующей частотой подканала и затем суммирование всех подканалов для формирования OFDM-сигнала очень схожа с операцией обратного преобразования Фурье. В связи с этим для формирования требуемого OFDM-символа применяют аппарат быстрого обратного преобразования Фурье (ОБПФ), что значительно упрощает реализацию модуляторов. Упрощенная структура формирования поднесущих, вставок циклических префиксов для организации защитных интервалов (ЗИ) с отображением сигналов, поступающих в приемник по разным путям распространения с задержками, показана на рис. 2. В этом случае циклический суффикс реализуется путем копирования начала OFDM-символа в конец и служит для уменьшения межсимвольной интерференции между восходящим и нисходящим трафиком (рис. 3).

Базовая структура общей обработки в основной полосе частот передатчика OFDM показана на рис. 4. На бинарных входных данных передатчик выполняет кодирование, чередование, отображение квадратурной амплитудной манипуляции (QAM), N_c -точечное ОДПФ и добавляет циклический префикс прежде, чем окончательный сигнал передатчика будет обработан окном, перенесенным в аналоговую область цифроаналоговым преобразователем (ЦАП), преобразован на радиочастоту в квадратурных каналах и излучен.

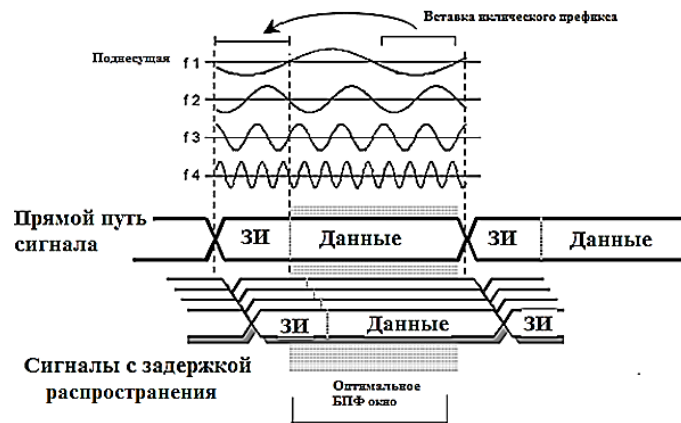


Рис. 2. OFDM-символы с циклическим префиксом

Формирование символов OFDM. Помимо поднесущих, на которых передается информация, существуют служебные поднесущие. К таким относятся защитные интервалы, пилот-сигналы и дополнительная служебная информация для синхронизации приемника и передатчика, и режимов их работы. Пилот-сигналы могут иметь фиксированное положение на поднесущих, или переменное циклически изменяющееся от символа к символу OFDM в кадрах [8, 15–17].

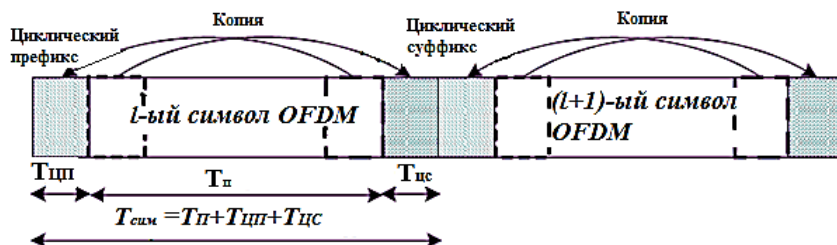


Рис. 3. Добавление циклического суффикса к OFDM-символу

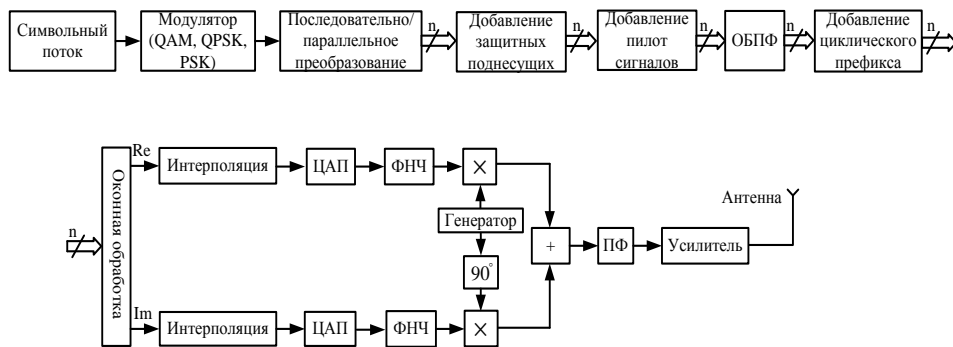


Рис. 4. Структурная схема передатчика OFDM

Чаще всего используют оба варианта одновременно. Пилот-сигналы служат для оценки параметров канала и оценки смещения в спектре OFDM-сигнала, они могут быть модулированы псевдослучайной последовательностью или быть чистыми тонами, что определяется стандартами для различных систем связи [9, 14]. Также стоит отметить, что в работах, исследующих возможности когнитивного радио, пилот-сигналы служат для идентификации передатчика и прогнозирования его работы. Защитные поднесущие представляют собой нулевые по амплитуде поднесущие, которыми заменяют информационные поднесущие по краям OFDM-символа, показанного на рис. 5, что является одним из способов уменьшения внеполосного излучения и позволяет упростить реализацию интерполирующих фильтров.

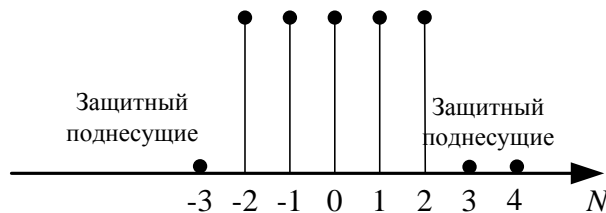


Рис. 5. Использование защитного интервала для уменьшения внеполосного излучения

Рассмотрим влияние защитного интервала на внеполосное излучение. Для этого рассмотрим спектр последовательности двух OFDM-символов без оконной обработки, информационные несущие модулированы схемой QAM4. При полосе сигнала 4 МГц рассматривались 1024 поднесущих. На рис. 6 показаны результаты расчета модуля спектра комплексной огибающей при различных защитных интервалах.

Из анализа этого рисунка следует, что чем больше защитные интервалы, тем более крутые склоны спектра мы получаем, однако это приводит к значительному сужению ширины информационного спектра сигнала.

Также стоит отметить особые точки. В случае, если используется вариант с поднесущими, представленный на рис. 7, то в спектре сигнала имеется постоянная составляющая (DC – Direct Current), представляющая собой поднесущую, которая при преобразовании сигнала в рабочую полосу частот будет соответствовать несущей частоте.

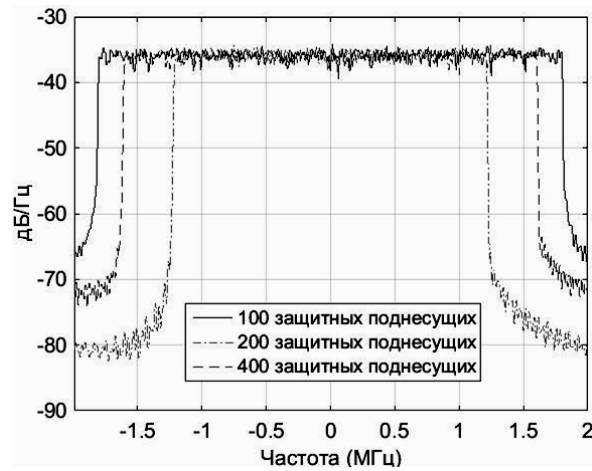


Рис. 6. Спектр OFDM символа при различном числе защитных поднесущих, используемых для формирования защитного интервала

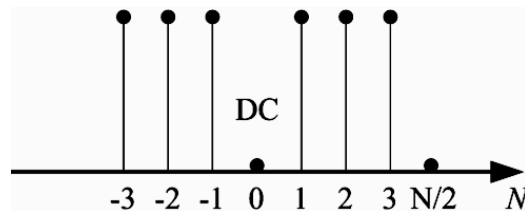


Рис. 7. Добавление DC-поднесущей в OFDM-символ

Кроме того, нулевая DC поднесущая используется в мобильных устройствах для синхронизации частот несущей OFDM-сигнала. Вторая особая точка соответствует половине частоты дискретизации $N/2$. Сложность ее использования заключается в том, что частоты дискретизации сигналов приемника и передатчика должны точно совпадать, иначе это приведет к тому, что поднесущая $N/2$ разделится на две поднесущие с уменьшенными значениями в два раза, что приведет к неверной интерпретации информации на приемной стороне.

Процесс интерполяции позволяет повысить частоты дискретизации полезного сигнала после оконной обработки. Сигнал разделяется на реальную и мнимую части, которые независимо интерполируются (см. рис. 4). Интерполяция осуществляется с помощью трех каскадов фильтров, которые представляют собой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), гребенчатого фильтра (СГФ), компенсатора неравномерности АЧХ-гребенчатого фильтра. Величина интерполяции разделяется между каждым из каскадов фильтров. После интерполяции отсчеты сигнала поступают на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), в котором сигнал преобразуется в аналоговую форму. После прохождения через фильтр нижних частот (ФНЧ) сигнал поступает на квадратурный смеситель, который переносит полезный спектр OFDM-сигнала на несущую частоту.

Сохранение ортогональности является необходимым для того, чтобы приемник мог правильно распознать информацию на поднесущих. Для этого необходимо выполнить следующие условия:

1. Приемник и передатчик должны быть точно синхронизированы.

2. Аналоговые компоненты передатчика и приемника, должны быть очень высокого качества.

3. Канал не должен быть многопутным.

К сожалению, многопутное искажение практически неизбежно в системах радиосвязи, что приводит к повреждению полученного сигнала. Для устранения такого рода помех необходимо выбрать защитный интервал дольше, чем максимальная задержка распространения в канале. Таким образом, можно устранить большинство видов интерференции между каналами (т.е. интерференцию между поднесущими (ICI)) и между смежными блоками передачи (т.е. межсимвольную интерференцию (ISI)).

Уменьшение внеполосного излучения OFDM-сигналов. Для уменьшения внеполосного излучения сигналов используется оконная обработка временного сигнала, окном типа приподнятый косинус. На практике спектр OFDM-сигнала имеет множество боковых лепестков, которые медленно затухают в частотной области, что приводит к увеличению внеполосного излучения. Помимо применения защитных поднесущих, добавляемых по краям OFDM-сигнала, для снижения побочного излучения OFDM-символа применяется обработка сигнала с помощью оконной обработки. Целью оконной обработки является осуществление плавного перехода между концом предыдущего и началом текущего символа. Плавный переход осуществляется с помощью перекрытия во времени циклического префикса текущего символа и циклическим суффиксом предыдущего символа в результате их суммирования. Как было описано выше, циклический суффикс представляет собой копию начала символа (без учета циклического префикса). Во временной области окно типа приподнятый косинус представлено выражением [10-11]:

$$h(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\beta)}{2}; \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi}{\beta \cdot T} \left(|t| - \frac{T(1-\beta)}{2} \right) \right] \right), & \frac{T(1-\beta)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\beta)}{2}; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где T – длительность символа, включая защитный интервал; β – спад или коэффициент скругления (rolloff), может быть от нуля до единицы.

В случае, если значение коэффициента скругления равен нулю, то фильтр превращается в идеальный нереализуемый фильтр нижних частот. Из анализа формулы (1) следует, что коэффициент β определяет длительность спада фильтра приподнятого косинуса. Поскольку при формировании OFDM-сигнала математические операции осуществляют над цифровыми отсчетами, выражение (1) удобно представить в следующем виде:

$$h(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |n| \leq \frac{T-T_w}{2}; \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi}{T_w} \left(|n| - \frac{T-T_w}{2} \right) \right] \right), & \frac{T-T_w}{2} \leq |n| \leq \frac{T+T_w}{2}; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где T – длительность символа OFDM в отсчетах; T_w – длительность окна (спада косинуса).

Затем необходимо обосновать выбор длительности окна. Поскольку информационную длительность символа желательно передавать без искажений, то в течение длительности информационной части символа $T_{\text{сим}}$, выбранное окно не

должно вносить искажения. Для этого оконная функция должна быть равна единице на требуемом интервале. Спад косинусного фильтра следует применять к циклическим префиксу и суффиксу. Следовательно, длительность спада окна приподнятого косинуса необходимо выбрать равной или меньшей длительности циклического префикса.

Для устранения внеполосных излучений применяется оконная обработка для каждого OFDM-символа с помощью окна поднятого [12] косинуса.

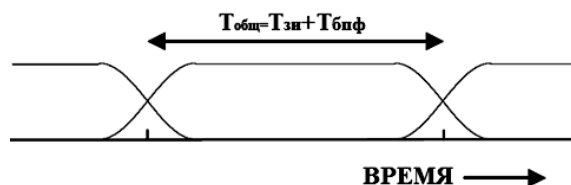


Рис. 8. Принцип оконной обработки

На рис. 8 схематично отображено выполнение оконной обработки в символах OFDM. В многопутном канале с замираниями входной сигнал приемника будет суммой задержанных копий переданных поднесущих [13–15]. В случае, если защитный интервал (ЗИ) по времени $T_{ЗИ}$ после вычитания половины переднего и заднего фронтов оконной обработки больше, чем максимальная задержка в канале, можно будет осуществить выбор окна таким образом, чтобы в заданном интервале БПФ поместилось целое число циклов для каждой из компонент многопутного распространения, при этом сохранив условие ортогональности [16, 17].

Результаты исследования. Исследование влияния уровня внеполосного излучения в зависимости от длины спада окна типа «приподнятый косинус» по отношению к длительности защитного интервала OFDM-символа выполнено на примере OFDM-символа, имеющего 1024 поднесущих. Из этих поднесущих 400 являются защитными, а остальные 624 поднесущие – информационные. Выберем длительность защитного интервала, равную 1/4 от длительности всего символа, которая будет равна 256 отсчетам. Помимо этого зададимся переменной длительностью временного окна, как было описано выше, и рассмотрим его влияние на уровень излучения вне полосы пропускания, равной 2,43 МГц. Результат модуль-спектра комплексной огибающей будет соответствовать спектру, представленному на рис. 9.

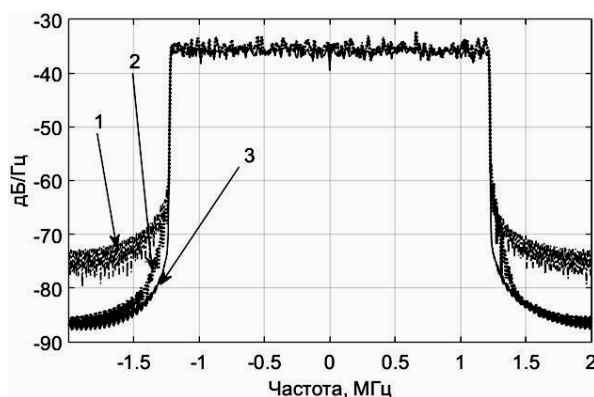


Рис. 9. Зависимость затухания от различной длины оконной функции

На рис. 9 цифрой 1 отмечен спектр OFDM-сигнала без применения оконной обработки, цифрой 2 обозначен спектр сигнала, где длительность оконной функции составляет $1/16$ от длительности защитного интервала и, наконец, цифрой 3 отмечен спектр сигнала, где длительность оконной функции, т.е. спад функции (приподнятый косинус) полностью совпадает с длительностью циклического префикса. Из рисунка видно, что применение оконной обработки для формирования символов OFDM позволяет значительно снизить внеполосное излучение при его использовании в адаптивных алгоритмах беспроводного доступа на основе принципа MIMO (Multiply Input-Multiply Output) [18–20]. Для данной длительности циклического префикса можно ограничиться длительностью окна, равной $1/4$ от длительности символа, так как результат практически совпадает с результатом, когда окно занимает весь защитный интервал (рис. 10).

Рассмотрим влияние длительности защитного интервала на уровень внеполосного излучения. При этом зададимся длительностью оконной функции равной длительности циклического префикса, так как это обеспечит наименьшее внеполосное излучение. При этом длительность префикса выберем, равной $1/128$, $1/16$, $1/4$ соответственно. Результат показан на рис. 11, где цифрами 1, 2 и 3 представлены спектры, соответствующие длительности циклических префиксов, по которым можно сделать вывод, что чем длиннее защитный интервал, тем меньше уровень внеполосного излучения.

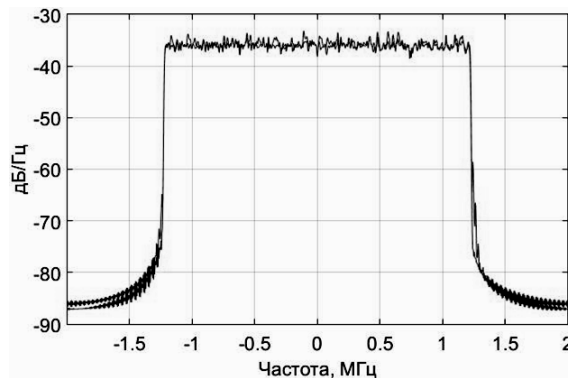


Рис. 10. Результат применения оконной обработки с длительностью окна, равной 1 и $1/4$ длительности защитного интервала

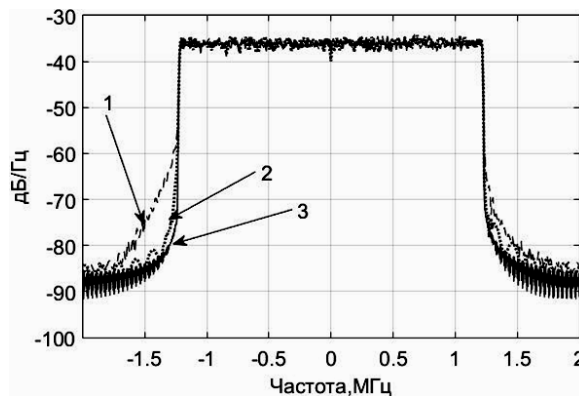


Рис. 11. Влияние длительности циклического префикса на уровень внеполосного излучения

Выводы. Таким образом, благодаря защитному интервалу и оконной обработке, широкополосное многопутное замирание представляется в OFDM как ряд узкополосных замирающих поднесущих без ICI и ISI. Единственным остаточным эффектом многопутности является случайная фаза и амплитуда у поднесущей. Этот эффект можно минимизировать, исправляя поднесущие принятого сигнала с амплитудами и фазами опорного сигнала, т.е. выполняя оценку этих параметров сигнала на поднесущей, которая может быть получена во время передачи пилотной последовательности. Глубокие замирания на поднесущих все еще остаются проблемой.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации госзадания № 213.01-11/2014-11 «Методы, алгоритмы и программно-аппаратные средства обработки пространственно-временных сигналов в многофункциональных информационных системах». Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zou W.Y., Wu Y. COFDM An overview // IEEE Trans Broadcast. – March 1995. – Vol. 41. – P. 1-8.
2. Rohling H., May T., Bruninghaus K., Grunheid R. Broad-band OFDM radio transmission for multimedia applications // Pmc. IEEE. – Oct. 1999. – Vol. 87. – P. 1778-1788.
3. O'Neill R., Lopes L.N. Envelope variation and spectral splatter in clipped multicarrier signals // IEEE PIMRC. – Sept. 1995. – P. 71-75.
4. Li X., Cimini L.J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM // IEEE Commun. Lett. – Vol. 2. – P. 131-133.
5. Awaler G.A., van Nee R. Implementation of the magic WAND wireless ATM modem // IEEE GLOBECOM. – 1999. – P. 1-6.
6. Pauli M., Kuchenbecker H. P. On the reduction of the out-of-band radiation of OFDM signals // IEEE ICC (New York, NY, USA). – 1998. – P. 1304-1038.
7. Speth M. OFDM receivers for broadband-transmission. – April 1999. – http://www.ert.rwth-aachen.de/Projekte/Theo/OFDM/www_ofdm.html.
8. Kocan E., Djuricic M.P., Veljovic Z. Efficient Frequency Synchronization and Channel Estimation: Method for OFDM Wireless Systems // IEEE. – 2010. – P. 487-491.
9. ETSIEN 300 744. – V1.6.1 – (2009-01): «Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television». – P. 80.
10. Glover I., Grant P. Digital Communications (2-nd ed.). Pearson Education Ltd. – 2004. – 1025 p. – ISBN 0-13-089399-4.
11. Proakis J. Digital Communications (3rd ed.). McGraw-Hill Inc. – 1995. – 1150 p. – ISBN 0-07-113814-5.
12. Van Nee R., Prasad R. OFDM for Mobile Multimedia Communications. – Boston, Artech House, 2000. – 260 p. – ISBN 0-89-006530-6.
13. Van Nee R., Awater G., Morikura M., Takanashi H., Webster M., Helford K. New high rate wireless LAN standards // IEEE Communications Magazine. – Dec. 1999. – P. 1025.
14. Федосов В.П., Легин А.А., Ломакина А.В. Алгоритмы, основанные на технологии ММО-OFDM, для реализации цифрового гидроакустического канала связи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 148-158.
15. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Исследование и коррекция функции неопределенности цифрового телевизионного сигнала OFDM // Материалы Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы современности: человек, общество, техника». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – Ч. 4. – С. 15-22.
16. Федосов В.П., Ломакина А.В., Легин А.А. Моделирование системы беспроводной передачи данных на основе антенных решеток в подводном акустическом канале // Труды Междун. научн. конф. «Излучение и рассеивание ЭМВ – ИРЭМВ-15». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 721-725.

17. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Устойчивость к ошибкам в оценке весовых векторов адаптивного пространственно-временного алгоритма радиосвязи на антенных решетках в релейском канале // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 37-44.
18. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решетки при использовании MIMO-OFDM в релейском канале // Антенны. – 2013. – № 10. – С. 45-49.
19. Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М. Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 731-737.
20. Fedosov V.P., Emelyanenko A.V., Ternovaya N.O., Rubtsov R.V., Marchuk V.I. Adaptive algorithm for MIMO-system of the wireless access for the receiver of the mobile station // Proceedings of 2014 IEEE 41th International Conference on signal processing, Hang Zhou. – 2014. - P. 1537-1541. - ISBN: 978-146732194-5.

REFERENCES

1. Zou W.Y., Wu Y. COFDM An overview, *IEEE Trans Broadcast*, March 1995, Vol. 41, pp. 1-8.
2. Rohling H., May T., Bruninghaus K., Grunheid R. Broad-band OFDM radio transmission for multimedia applications, *Pmc. IEEE*, Oct. 1999, Vol. 87, pp. 1778-1788.
3. O'Neill R., Lopes L.N. Envelope variation and spectral splatter in clipped multicarrier signals, *IEEE PIMRC*, Sept. 1995, pp. 71-75.
4. Li X., Cimini L. J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM, *IEEE Commun. Le*, Vol. 2, pp. 131-133.
5. Awaler G.A., van Nee R. Implementation of the magic WAND wireless ATM modem, *IEEE GLOBECOM*, 1999, pp. 1-6.
6. Pauli M., Kuchenbecker H. P. On the reduction of the out-of-band radiation of OFDM signals, *IEEE ICC (New York, NY, USA)*, 1998, pp. 1304-1038.
7. Speth M. OFDM receivers for broadband-transmission. April 1999. Available at: http://www.ert.rwth-aachen.de/Projekte/Theo/OFDM/www_ofdm.html.
8. Kocan E., Djuricic M.P., Veljovic Z. Efficient Frequency Synchronization and Channel Estimation: Method for OFDM Wireless Systems, *IEEE*, 2010, pp. 487-491.
9. ETSIEN 300 744. – V1.6.1 – (2009-01): «Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television», pp. 80.
10. Glover I., Grant P. Digital Communications (2-nd ed.). Pearson Education Ltd, 2004, 1025 p. ISBN 0-13-089399-4.
11. Proakis J. Digital Communications (3rd ed.). McGraw-Hill Inc., 1995, 1150 p. ISBN 0-07-113814-5.
12. Van Nee R., Prasad R. OFDM for Mobile Multimedia Communications. Boston, Artech House, 2000. – 260 p. ISBN 0-89-006530-6.
13. Van Nee R., Awater G., Morikura M., Takanashi H., Webster M., Helford K. New high rate wireless LAN standards, *IEEE Communications Magazine*, Dec. 1999, pp. 1025.
14. Fedosov V.P., Legin A.A., Lomakina A.V. Algoritmy, osnovannye na tekhnologii MIMO-OFDM, dlya realizatsii tsifrovogo gidroakusticheskogo kanala svyazi [The algorithm is based on MIMO-OFDM technology for the realization of digital hydroacoustic communication channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 148-158.
15. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Issledovanie i korrektsiya funktsii neopredelennosti tsifrovogo televizionnogo signala OFDM [The study and correction of the ambiguity function of a digital television signal OFDM], *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremenosti: chelovek, obshchestvo, tekhnika»* [Materials of all-Russian scientific conference "Actual problems of modernity: people, society, technology"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012. Part 4, pp. 15-22.
16. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A. Modelirovanie sistemy besprovodnoy peredachi dannykh na osnove antennykh reshetok v podvodnom akusticheskom kanale [The simulation system of wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channel], *Trudy Mezhdun. nauchn. konf. «Izluchenie i rasseivanie EMV – IREMV-15»* [Proceedings of International scientific conference "Radiation and scattering of emws – IRANG-15"]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 721-725.

17. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Ustoychivost' k oshibkam v otsenke vesovykh vektorov adaptivnogo prostranstvenno-vremennogo algoritma radiosvyazi na antennykh reshetkakh v releevskom kanale [Stability to errors in the estimation of weight vectors of adaptive existential algorithm of the radio communication on antenna lattices in the rayleigh's channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 37-44.
18. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO OFDM v releevskom kanale [Comparative efficiency of wireless access on the basis of spatial adaptation at the outputs of the antenna array using MIMO OFDM in Rayleigh channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10, pp. 45-49.
19. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M. Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms of multichannel processing of broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2012, No. 11, pp. 731-737.
20. Fedosov V.P., Emelyanenko A.V., Ternovaya N.O., Rubtsov R.V., Marchuk V.I. Adaptive algorithm for MIMO-system of the wireless access for the receiver of the mobile station, *Proceedings of 2014 IEEE 41th International Conference on signal processing, Hang Zhou*, 2014, pp. 1537-1541. ISBN: 978-146732194-5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Федосов Валентин Петрович – Южный Федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru, vpfed@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632, 89525601246; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Ковтун Данил Георгиевич – e-mail: dan-kav@ya.ru; тел.: 89613023811; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Легин Андрей Алексеевич – e-mail: legin.andrey@gmail.com; тел.: 89518374483; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Ломакина Анна Владимировна – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; тел.: 89515050232; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – South Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru, vpfed@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632, +79525601246; the department of fundamental of radioengineering; dr. of eng. sc.; professor.

Kovtun Danil Georgievich – e-mail: dan-kav@ya.ru; phone: +79613023811; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

Legin Andrey Alekseevich – e-mail: legin.andrey@gmail.com; phone: +79518374483; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

Lomakina Anna Vladimirovna – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; phone: +79515050232; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

УДК 621.391.24.001.57

В.С. Плаксиенко, А.Р. Гайдук

МИНИМИЗАЦИЯ СКО СИСТЕМ ФАПЧ В РЕЖИМЕ СЛЕЖЕНИЯ

В радиоэлектронных системах различного назначения широкое применение находят системы фазовой автоподстройки частоты, основным назначением которых является согласование частоты и фазы подстраиваемого генератора системы с частотой и фазой полезного сигнала. Так как полезный сигнал обычно сопровождается случайными помехами, то системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) должны в максимальной степени подавлять влияние этих случайных помех. В статье рассматривается аналитический ме-