

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.12

УДК 621.396.1

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ С OFDM- МОДУЛЯЦИЕЙ

С. С. Старицин, А. Н. Абакумов, А. В. Передрий, А. В. Павлов

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2020 г., после доработки – 16 июня 2020 г.

Аннотация. Статья посвящена разработке методики оценивания частотно-временных параметров OFDM-сигналов, находящихся все большее распространение в современных системах связи и передачи данных. Методика разработана для применения в условиях априорной параметрической неопределенности. В работе представлена описательная модель данных сигналов, учитывающая особенности их формирования и применения, выявленные на основе модели зависимости параметров OFDM-сигналов от параметров их сигналообразования, которые проявляются в особенностях формы модуля автокорреляционной функции сигнала во временной области и особенностях спектра OFDM-сигналов. Указанные зависимости составили основу методики, позволяющей в условиях априорной неопределенности относительно параметров сигналообразования оценить число поднесущих частот в сигнале, а также частоту дискретизации, при которой формировался OFDM-сигнал. В качестве подтверждения работоспособности предлагаемой методики и правильности теоретических выводов в работе представлен практический пример обработки OFDM-сигнала.

Ключевые слова: OFDM-сигналы, модуляция, параметры сигналообразования.

Abstract. Recent mobile communication standards, such as LTE, Wi-Fi, DVB-T, WiMAX, are based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). This is due to the fact that OFDM signals allow the efficient use of frequency band in conditions of multipath fading. The aim of this paper is to develop a method for estimating the parameters of OFDM signals, namely: the number of orthogonal

channels (subcarriers) and sampling rates for modulation/demodulation. The model of these signals is presented, taking into account the features of their formation and application. The analysis of the model showed regular relationships between the parameters of OFDM signals and the parameters of signal formation. The revealed regular relationships are based on the features of the autocorrelation function shape and the features of the spectrum of OFDM signals. The correctness of the theoretical provisions is confirmed by checking the operability of the proposed method on real signals.

Keywords: OFDM-signals, modulation, signalization parameters.

Введение

Тенденция развития систем связи характеризуется внедрением различных принципов сигналообразования, которые позволяют повысить эффективность использования частотно-временного ресурса. Так, на физическом уровне применяется все большее разнообразие методов модуляции, эффективно использующих полосу частот [1, 2, 3]. Одним из таких методов является OFDM-модуляция (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением).

Теоретическая база формирования сигналов с OFDM-модуляцией разработана в середине 60-х годов прошлого века, но из-за сложности реализации OFDM-модемов на основе аналоговых преобразований их внедрение не представлялось возможным. В настоящее время бурное развитие вычислительных систем и методов цифровой обработки сигналов позволили активно внедрять OFDM-сигналы в самых различных системах связи. Например, такие сигналы широко применяются для организации связи в условиях замираний и многолучевого распространения радиоволн [4]. Эти виды помех характерны для коротковолнового диапазона частот, а также городской и гористой местностей из-за многократных отражений радиосигнала от препятствий. В связи с этим сигналы с OFDM-модуляцией используются в широко известных и повсеместно внедренных стандартах современной связи и телевидения LTE, Wi-Fi, DVB-T, WiMAX.

Необходимо отметить, что в настоящее время научно-методический аппарат обработки указанного типа сигналов в условиях априорной неопределенности относительно параметров их сигналообразования разработан недостаточно. Это в значительной степени затрудняет выполнение задач Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ), связанных с контролем надлежащего использования радиочастотного ресурса [5]. Исследование направлено на разработку методики, позволяющей оценивать параметры формирования сигналов с OFDM-модуляцией, а именно: частоту дискретизации, при которой формировался сигнал, и число поднесущих частот группового сигнала. Значения этих параметров используется для демодуляции сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности при выполнении задач ГКРЧ.

1. Модель формирования сигналов с OFDM-модуляцией

Процедура формирования сигналов с OFDM-модуляцией отличается от методов формирования сигналов с традиционными видами модуляции (ФМн, КАМ, АФМ и т.д.) [6]. Например, отличительной особенностью является применение обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), позволяющего разделить исходный цифровой поток передаваемых данных на множество ортогональных каналов. Структурная схема формирователя сигналов с OFDM-модуляцией представлена на рис. 1.

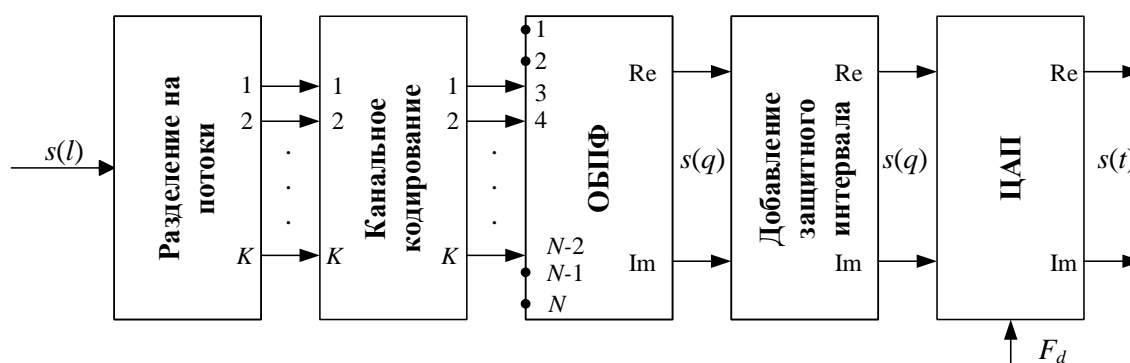


Рис. 1. Структурная схема формирователя сигналов с OFDM-модуляцией.

На вход формирователя сигналов с OFDM-модуляцией поступает цифровой поток (информационная последовательность) $s(l)$, где l – номер

элемента последовательности, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$; L – число элементов последовательности, поступающей на вход формирователя. На первом этапе входной поток накапливается и поступает на выход в параллельном виде по $K = N - k$ элементов, где $N = 2^n$ – общее число каналов (поднесущих частот) OFDM-сигнала, n – натуральное число, k – число защитных каналов (нулевых поднесущих частот). Кратность общего числа ортогональных каналов степени двойки обусловлена наличием этапа с ОБПФ.

Защитные интервалы представляют собой неиспользуемые каналы (поднесущие частоты), расположенные симметрично по краям спектра группового сигнала. Их применение в частотной области обусловлено неидеальностью приема-передающих трактов и, как следствие, искажениями сигналов. Для пояснения размещения защитных каналов в сигналах с OFDM-модуляцией на рис. 2 представлен амплитудный спектр группового OFDM-сигнала.

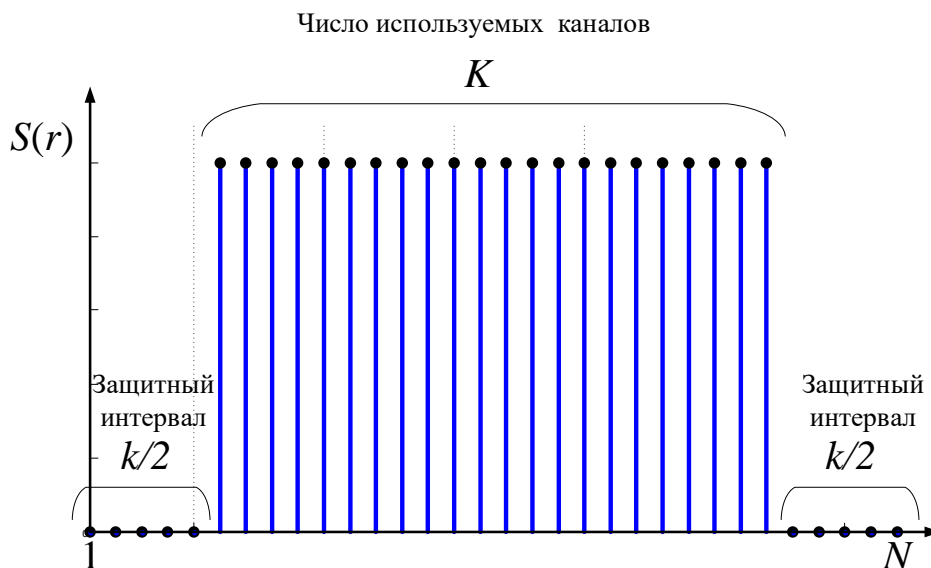


Рис. 2. Схематичное представление амплитудного спектра сигнала с OFDM-модуляцией с 32 поднесущими частотами.

На втором этапе осуществляется канальное кодирование, которое заключается в отображении элементов цифровой последовательности на комплексную плоскость. В качестве примера на рис. 3 представлен вариант отображения элементов цифровой последовательности с алфавитом $\{0, 1, 2, 3\}$

на комплексную плоскость при модуляции OFDM-QPSK.

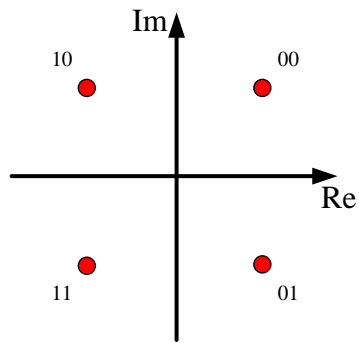


Рис. 3. Пример отображения элементов цифрового потока на комплексную плоскость.

На третьем этапе формирования сигналов с OFDM-модуляцией на вход блока ОБПФ, с учетом нулевых элементов защитного интервала, поступает по N элементов и осуществляется формирование сигнала во временной области (в последовательном виде). Соседние поднесущие группового OFDM-сигнала характеризуются сильным перекрытием спектров (Рис. 4). При этом они не оказывают взаимного влияния друг на друга. Это обусловлено ортогонализацией цифровых данных, передаваемых на соседних поднесущих, посредством процедуры ОБПФ. Это позволяет уменьшить в два раза значение частотного разноса между смежными поднесущими и во столько же раз повысить эффективность использования полосы частот сигнала.

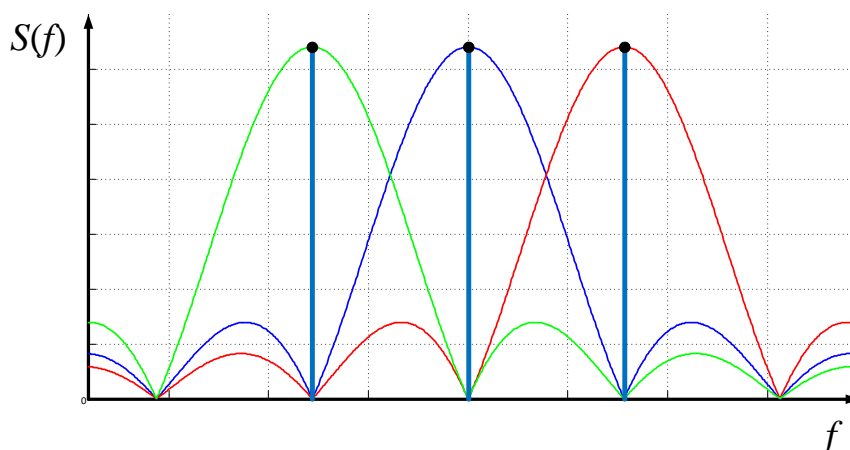


Рис. 4. Графическая иллюстрация перекрытия спектров соседних поднесущих группового OFDM-сигнала.

Для снижения межсимвольной интерференции при формировании сигналов с OFDM-модуляцией защитные интервалы используются и во

временной области. На практике наибольшее применения получил защитный интервал, который формируется путем копирования конца OFDM-слова. При этом длительность защитного интервала T_{cp} определяется исходя из условий распространения, но всегда кратна значению длительности информационной части T_i , что аналитически описывается следующим образом:

$$T_{cp} = d_{cp} \cdot T_i, \quad (1)$$

где d_{cp} – коэффициент избыточности во временной области,

$$d_{cp} \in \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \dots \right\}.$$

Принцип формирования защитного интервала во временной области в сигналах с OFDM-модуляцией представлен на рис. 5, где q – это номер элемента цифровой последовательности после ОБПФ.

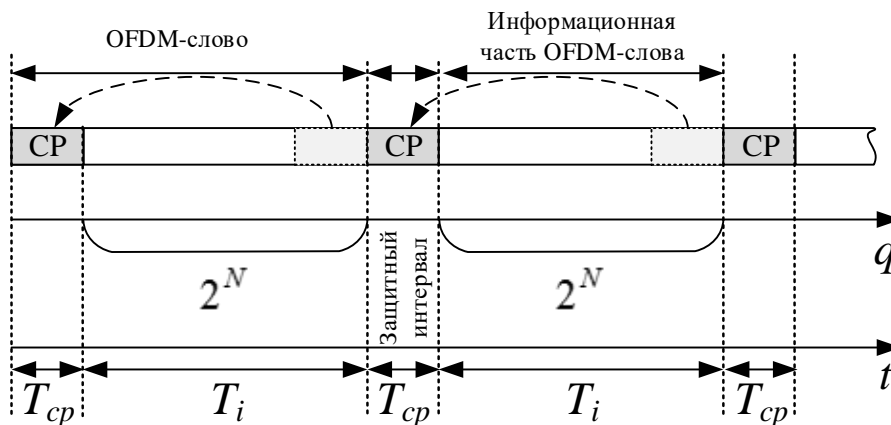


Рис. 5. Принцип формирования защитного интервала в сигналах с OFDM-модуляцией.

На последнем этапе осуществляется цифро-аналоговое преобразование (ЦАП) и последующий перенос сигнала на рабочую частоту. Необходимо обратить внимание на то, что ЦАП осуществляется с частотой дискретизации F_d , которая известна на приемной стороне и необходима для ортогональной демодуляции сигнала. Отсутствие знания о частоте дискретизации, с которой производилось ЦАП, и количестве поднесущих частот N , в свою очередь, не позволяет осуществить корректную демодуляцию сигнала при решении задач ГКРЧ.

Описанные принципы формирования сигналов OFDM-модуляцией в

совокупности образуют модель сигналов с частотно-временным мультиплексированием. Проведенный анализ данной описательной модели позволил выявить зависимости между параметрами сигналаобразования и параметрами сигналов OFDM-модуляцией, а его результаты легли в основу теоретического исследования, направленного на разработку методики оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией (далее Методика).

2. Основные этапы методики оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией

Исходными данными для разработанной Методики являются:

- сигнал с OFDM-модуляцией, представленный в виде цифровой записи с выхода аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) $u(t_s)$ на несущей частоте;
- значение частоты дискретизации АЦП $F_{\text{АЦП}}$, при которой записывался сигнал.

Основные этапы разработанной Методики представлены на рис. 6.



Рис. 6. Этапы оценивания параметров OFDM-сигналов.

Этап 1. На первом этапе вычисляется амплитудный спектр сигнала. Исходя из отношения сигнал/шум, устанавливается порог обнаружения

частотно-временной посылки $U_{\text{пор}}$ и оцениваются минимальная \tilde{f}_{min} и максимальная \tilde{f}_{max} частоты сигнала (рис. 7).

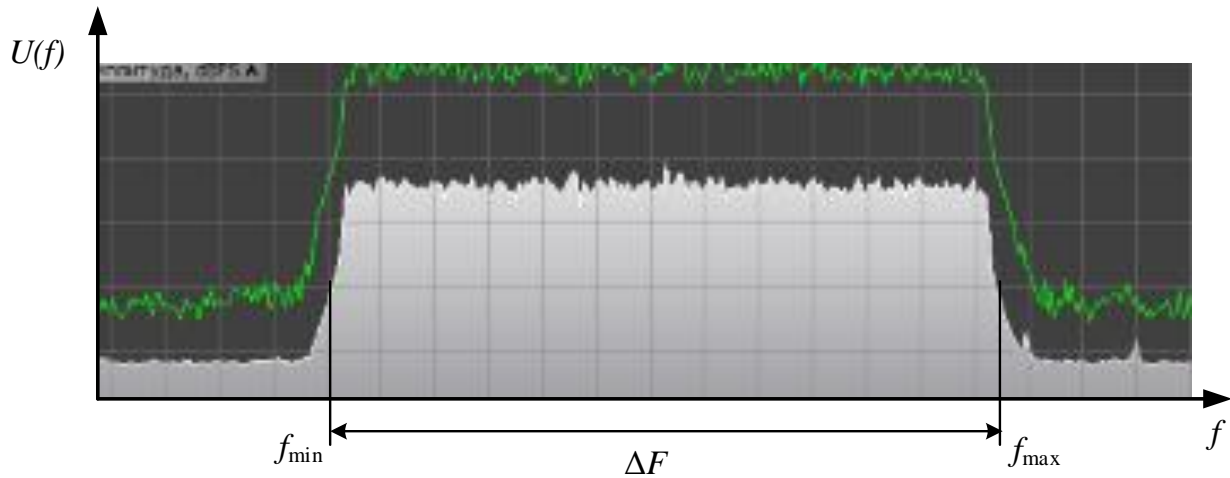


Рис. 7. Оценивание полосы частот сигнала.

Этап 2. Исходя из оценок нижней и верхней частоты сигнала, осуществляется вычисление несущей частоты \tilde{F}_n на основе следующего выражения:

$$\tilde{F}_n = \tilde{f}_{\text{min}} + \frac{\tilde{f}_{\text{max}} - \tilde{f}_{\text{min}}}{2} = \frac{\tilde{f}_{\text{max}} + \tilde{f}_{\text{min}}}{2}. \quad (2)$$

Значение несущей частоты анализируемого сигнала используется для его переноса на нулевую частоту известными методами цифровой обработки сигналов [6].

Этап 3. Для снижения величины погрешности оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией производится его фильтрация фильтром нижних частот. В качестве такого фильтра предлагается использовать нашедший широкое применение в системах связи фильтр с косинусоидальным сглаживанием амплитудно-частотной характеристики [6].

Этап 4. На четвертом этапе вычисляется модуль автокорреляционной функции (АКФ) сигнала во временной области [6]. Характерная особенность модуля АКФ огибающей сигнала с OFDM-модуляцией состоит в наличии локальных максимумов, отстоящих от центрального пика на величину T_i , если АКФ вычисляется по временной задержке, или N' , если – по смещению в

отсчетах сигнала, при текущем значении $F_{\text{АЦП}}$ (рис. 8). Эти локальные максимумы вызваны повторением сигнала при формировании защитного интервала во временной области (рис. 5).

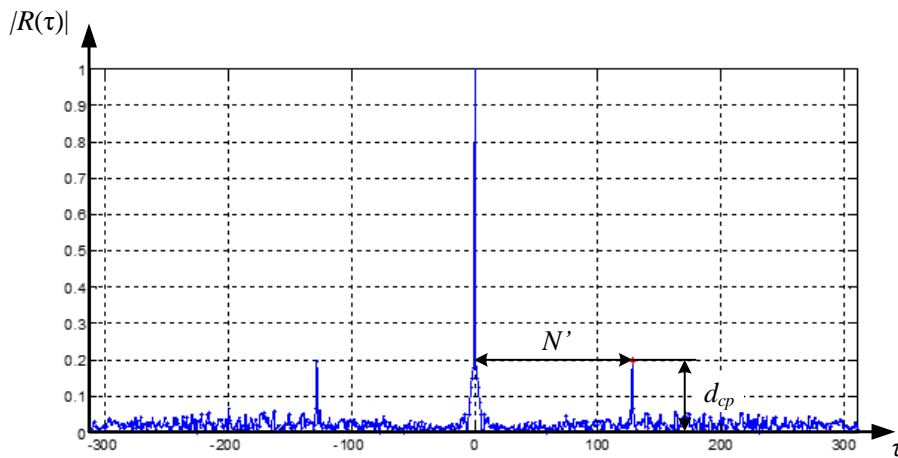


Рис. 8. Модуль АКФ сигнала с OFDM-модуляцией.

Величина локальных максимумов пропорциональна значению коэффициента избыточности d_{cp} . При вычислении модуля нормированной АКФ величина локальных максимумов стремится к d_{cp} при стремлении отношения сигнал/шум к бесконечности. На рис. 9 представлена зависимость оценки значения локальных максимумов \tilde{d}_{cp} от отношения сигнал/шум.

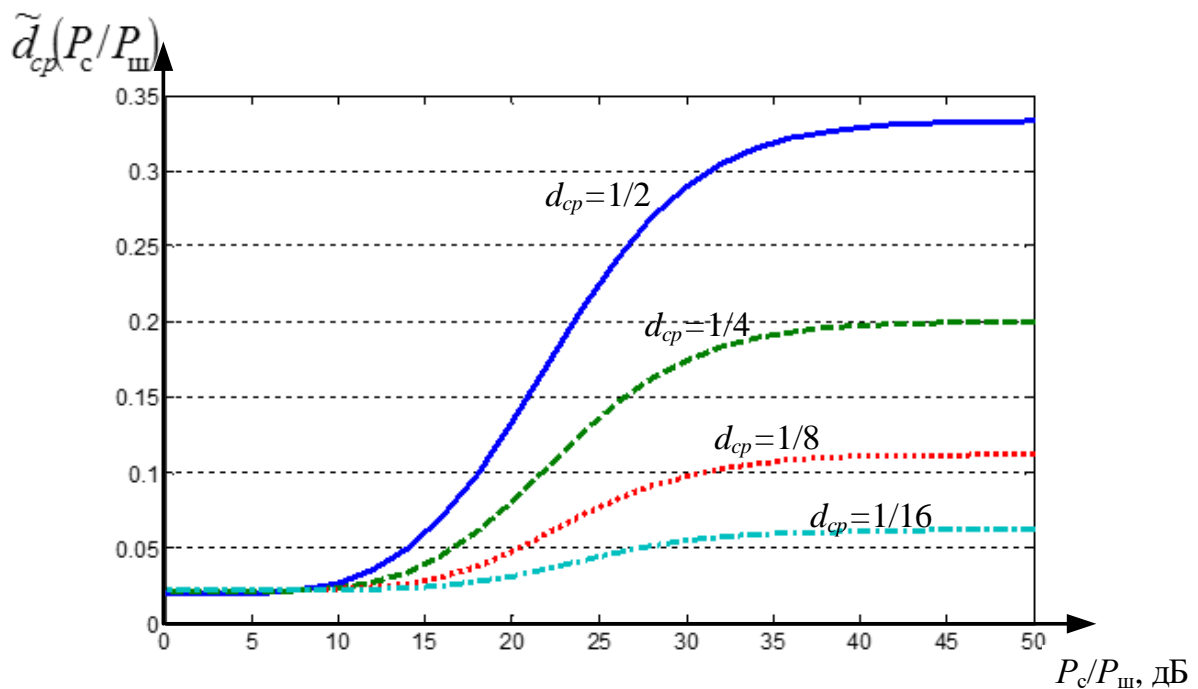


Рис. 9. Влияние шума на значение оценки d_{cp} .

Этап 5. На завершающем пятом этапе методики осуществляется оценивание числа каналов и частоты дискретизации, с которой осуществляется обработка на передающей (ЦАП) стороне (рис.1). С такой частотой дискретизации необходимо обрабатывать сигнал и на приемной стороне.

Ортогональные каналы (включая входящие в защитный интервал в частотной области) равномерно распределены в полосе F_d (рис. 2). Поэтому для оцениваемых параметров предварительно необходимо оценить коэффициент использования спектра при текущей $F_{\text{АЦП}}$

$$g = \frac{\Delta\tilde{F}}{F_{\text{АЦП}}} \quad (3)$$

Учитывая, что число поднесущих всегда кратно 2^n ,

$$\tilde{N} = 2^{\lceil \log_2(\tilde{R}) \rceil}, \quad \tilde{R} = N' \cdot g, \quad (4)$$

где \tilde{R} – грубая оценка числа поднесущих частот, $\lceil \cdot \rceil$ – округление в большую сторону. Округление в большую сторону обусловлено наличием защитного интервала и тем, что коэффициент использования спектра всегда меньше единицы.

Полученные оценки ширины спектра и числа поднесущих частот используются для вычисления частоты дискретизации, при которой формировался сигнал, в соответствии с выражением

$$\tilde{F}_d = \frac{F_{\text{АЦП}} \cdot \tilde{N}}{N'} \quad (5)$$

Таким образом, выполнение описанных процедур позволяет по имеющейся цифровой записи сигнала осуществлять оценивание основных параметров групповых OFDM-сигналов, к которым относятся: ширина спектра сигнала, число поднесущих частот и частота дискретизации при формировании сигнала. Знание этих параметров позволяет осуществлять корректную обработку сигналов при проверке выполнения предписаний ГКРЧ. Особенностью разработанной методики является использование вскрытых путём анализа модели сигналов с OFDM-модуляцией информативных признаков таких сигналов и их параметров. К таким признакам можно отнести специфическую

форму АКФ, имеющую локальные максимумы на расстоянии T_i от центрального максимума, а также количество поднесущих частот ортогональных каналов, равное целой степени двух, и их уплотнённое расположение, позволяющее повысить эффективность использования частотного ресурса.

Для проверки работоспособности предложенной (разработанной) методики рассмотрим её применение при обработке сигнала системы (канала) управления беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3.

Спектрограмма сигнала представлена на рис. 10.

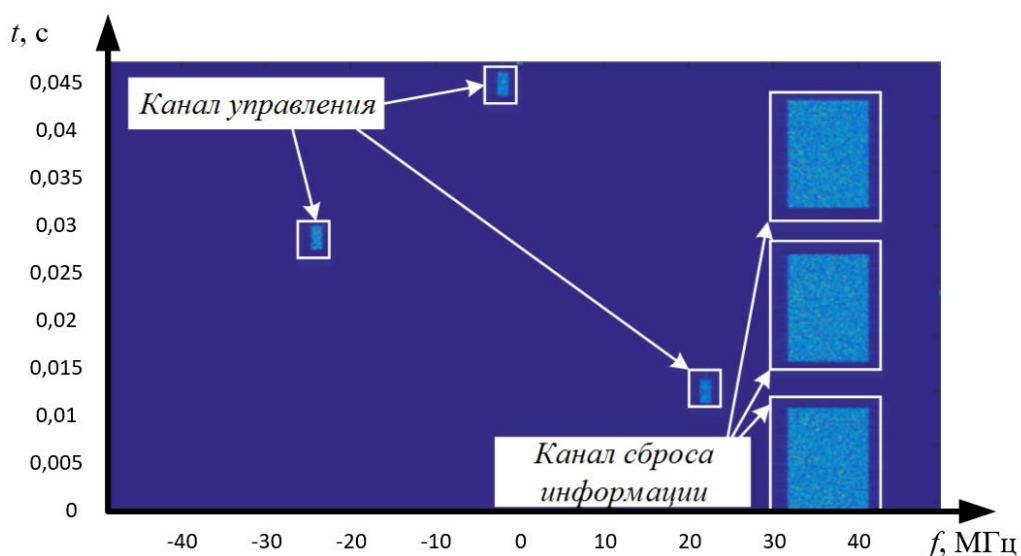


Рис. 10. Спектрограмма исходного OFDM-сигнала.

На рис. 10 видно, что в принимаемой полосе частот наблюдаются два вида посылок. Тип посылок с полосой ~ 1 МГц относится к каналу управления («Земля-БЛА»), с полосой ~ 10 МГц – к каналу видеосброса («БЛА-Земля»). Для дальнейшей обработки необходимо осуществить фильтрацию одной посылки канала управления.

Параметры исходного сигнала:

- длительность записи сигнала – 0,023 с;
- частота дискретизации – $F_{\text{АЦП}} = 11,666667$ МГц;
- отношений сигнал/шум – 30 дБ.

На первых трех этапах методики осуществляется фильтрация посылки по частоте и по времени, а также ее перенос на нулевую частоту. Эти этапы

выполняются широко известными и апробированными методами [6]. Оценка полосы частот, занимаемой сигналом, составила $\Delta\tilde{F} = 1\,295\,900$ Гц.

На четвертом этапе вычисляется модуль АКФ сигнала, оценивается значение N' до локального максимума и, соответственно, значение самого локального максимума, характеризующего T_{cp} (рис. 11). Для рассматриваемого сигнала $N' = 1066,85$, $d_{cp} = 0,123$.

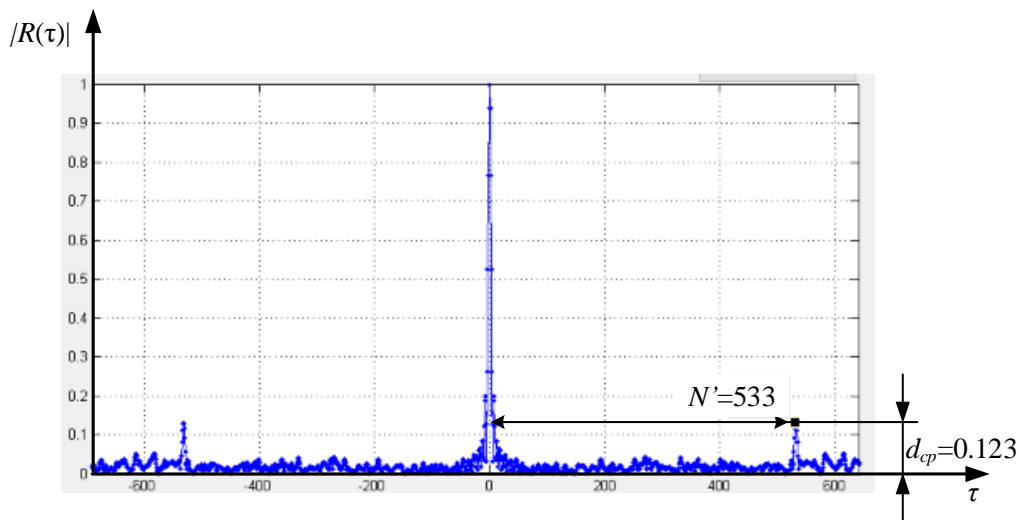


Рис. 11. Модуль АКФ OFDM-сигнала.

На пятом этапе вычисляем коэффициент использования спектра на основе выражения (3)

$$g = 1295900 / 11666667 = 0,111.$$

Исходя из выражения (4), оцениваем число поднесущих

$$\tilde{N} = 2^{\lceil \log_2(1066,85 \cdot 0,111) \rceil} = 128.$$

Частота дискретизации, необходимая для корректной демодуляции сигнала, вычисляется в соответствии с выражением (5)

$$\tilde{F}_d = \frac{11666667 \cdot 128}{1066,85} = 1399759,5.$$

С целью оценивания применимости методики в различных условиях рассмотрим влияние шумов на оценки вычисляемых параметров на примере анализируемого сигнала.

Научно-методический аппарат определения потенциальной точности измерений параметров простых и сложных радиосигналов достаточно хорошо

развит и описан в ряде работ, например, в [6]. Опираясь на эти результаты, оценим потенциальную точность частоты дискретизации и числа поднесущих частот в групповом OFDM-сигнале. Исходя из выражений (2), (3) и (4), на оцениваемые параметры влияют: отношение сигнал/шум, полоса частот и длительность анализируемого сигнала. На рис. 12 представлены зависимости математического ожидания числа поднесущих частот $M[\tilde{R}]$ и величин $M[\tilde{R}] \pm 2 \cdot \sigma[\tilde{R}]$, где $\sigma[\tilde{R}]$ – среднеквадратическое отклонение \tilde{R} , от отношения сигнал/шум. Необходимо отметить, что в выражении (4) присутствует операция округления в большую сторону, которая в определенных пределах нивелирует влияние шумов при оценивании \tilde{R} . Граница округления отмечена штриховой горизонтальной линией на рис. 12.

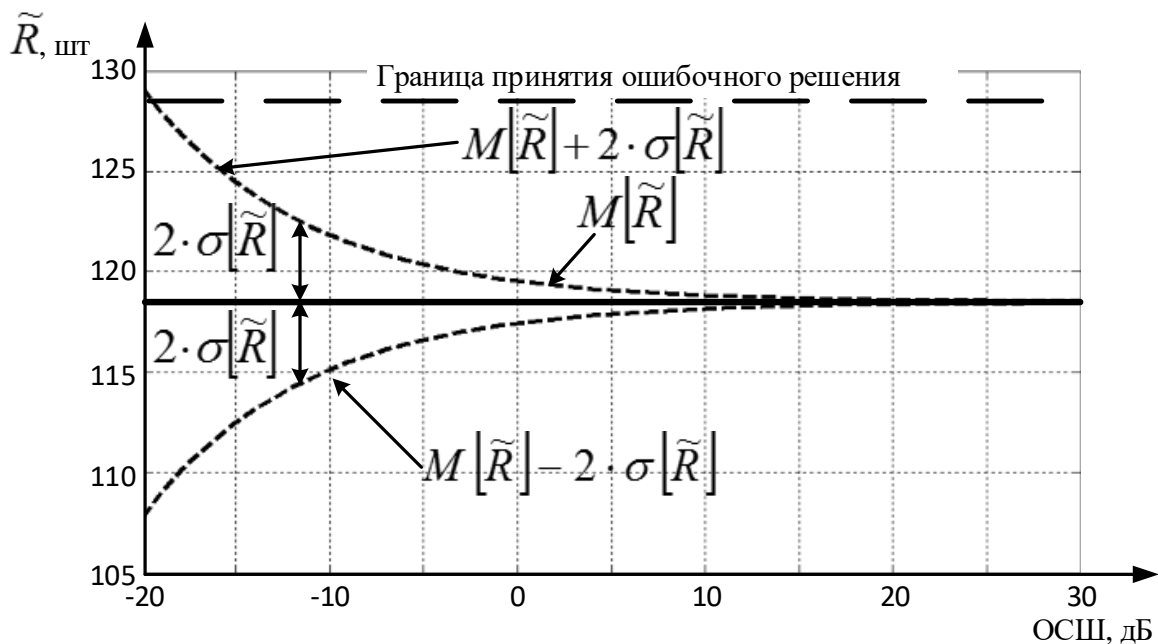


Рис. 12. Математическое ожидание \tilde{R} и границы $M[\tilde{R}] \pm 2 \cdot \sigma[\tilde{R}]$.

На рис. 13 представлена зависимость вероятности ошибочной оценки \tilde{N} от отношения сигнал/шум для рассматриваемого OFDM-сигнала.

Операция округления в выражении (4) позволяет при отношении сигнал/шум больше -6 дБ практически устранить ошибки при оценивании числа поднесущих частот, что выполняется в большинстве практических случаев. Таким образом, при дальнейшем рассмотрении точности оценивания

частоты дискретизации ограничимся значениями отношения сигнал/шум из диапазона ≥ -6 дБ.

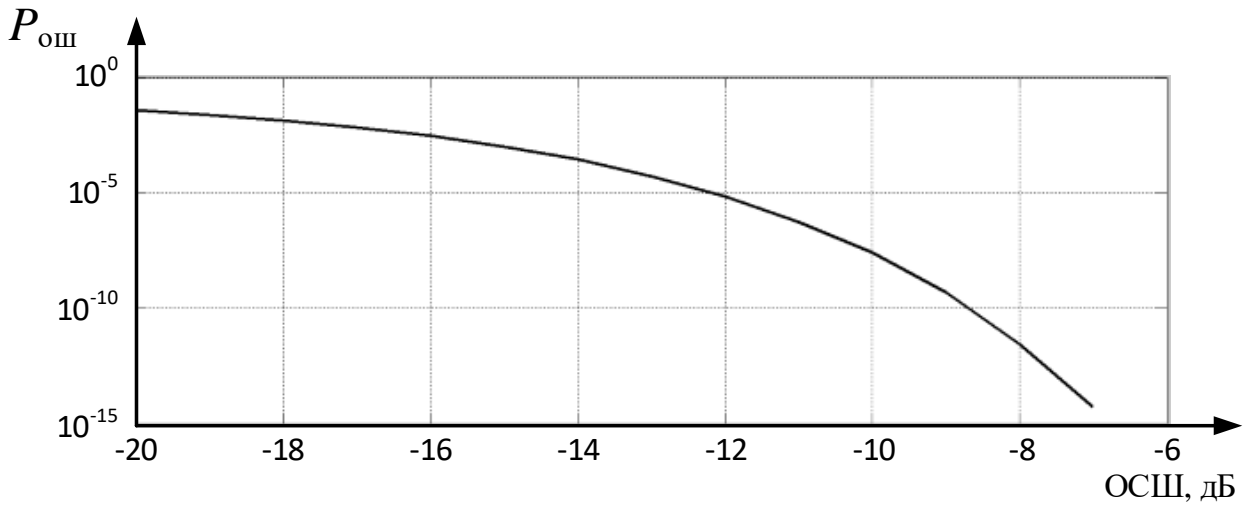


Рис. 13. Зависимость вероятности ошибочной оценки \tilde{N} от отношения сигнал/шум.

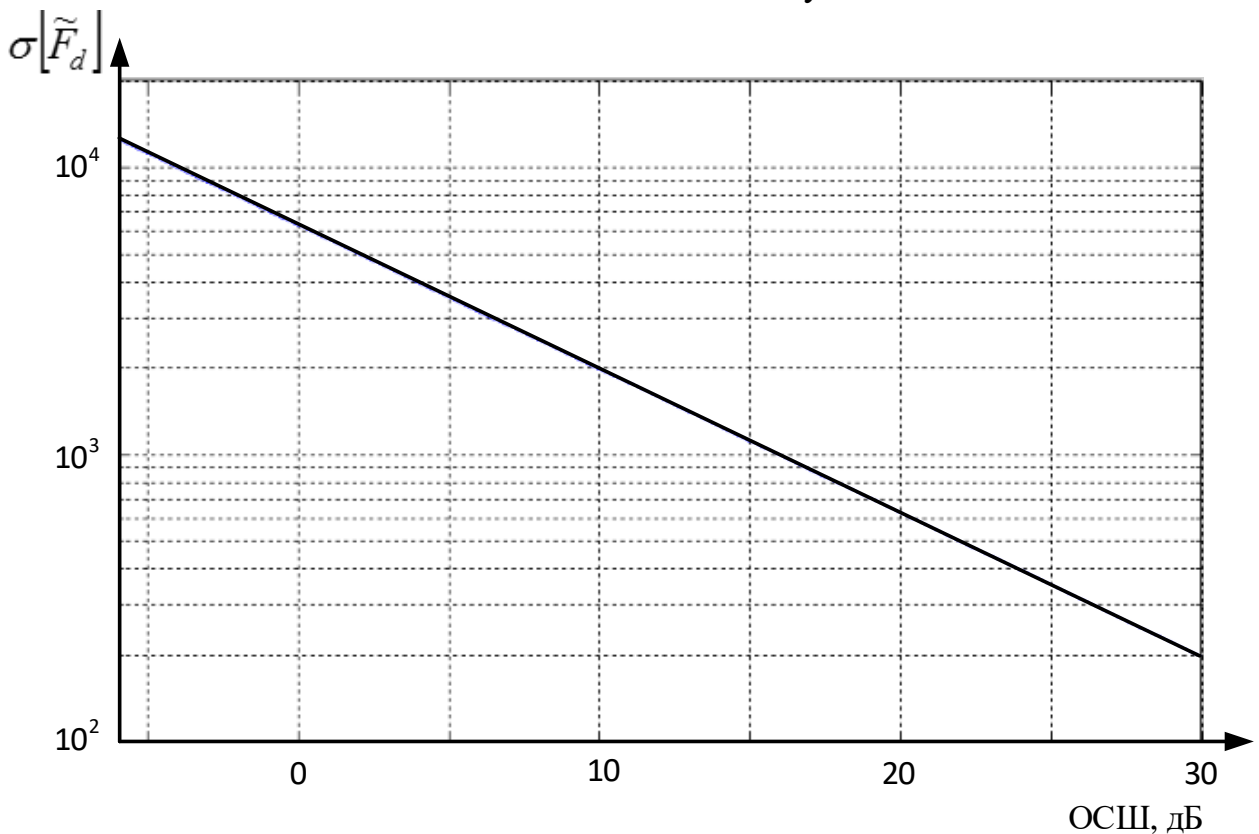


Рис. 14. Среднеквадратическое отклонение оценки частоты дискретизации OFDM-сигнала.

В соответствии с выражением (5), на точность оценки частоты дискретизации в рассматриваемых условиях влияет только точность

оценивания N' . Зависимость среднеквадратического отклонения оценки частоты дискретизации от отношения сигнал/шум представлена на рис. 14.

Частота дискретизации при формировании анализируемого сигнала составляла 1400000 Гц. Использование разработанной методики позволило получить оценку значения частоты дискретизации с ошибкой 240,5 Гц. При этом теоретическая точность оценивания $\sigma[\tilde{F}_d]$ в рассматриваемых условиях составляет 198,1 Гц (рис.14). Таким образом, для анализируемого сигнала теоретические и практические результаты не противоречат друг другу.

Заключение

В статье представлена методика, позволяющая оценить следующие параметры OFDM-сигналов: число каналов, частоту дискретизации и размер защитного интервала во временной области. Отсутствие знания об этих параметрах не позволяет производить их дальнейшую обработку. Применение разработанной методики позволяет оценить указанные параметры и создать условия для дальнейшей обработки OFDM-сигналов в условиях выполнения задач ГКРЧ.

Литература

1. Пукса А.О., Шевченко А.А. Перспективы развития и проблемы OFDM технологии / Сборник статей победителей IX Международной научно-практической конференции «World science: problems and innovations», Пенза, 2017. Издательство «Наука и просвещение», Пенза, 2017. С. 99-101.
2. Кадуков Е. П. Модель радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением в пространстве параметров фазовых диаграмм и комплекс информативных признаков для распознавания видов модуляции излучений зарубежных спутниковых систем связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.12
3. Рошан П. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. Пер. с англ.– М.: Издательский дом «Вильямс», 2004, – 304 с.

4. Фомин А.И., Хамад А. Анализ средней вероятности ошибки приема с медленными и быстрыми замираниями в каналах связи. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 5. С. 53-61.
5. Постановление Правительства РФ от 2 июля 2004 г. N 336 «Об утверждении Положения о Государственной комиссии по радиочастотам» [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://base.garant.ru/187178/> (дата обращения: 01.04.2020).
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.

Для цитирования:

Старицин С.С., Абакумов А.Н., Передрий А.В., Павлов А.В. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/12/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.12