

УДК 004.9: 621.391.7

# МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ OFDM СИГНАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ДИСКРЕТНЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Александр Замула, Владислав Морозов

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина  
[zamylaaa@gmail.com](mailto:zamylaaa@gmail.com), [ilissar@hotmail.com](mailto:ilissar@hotmail.com)Рецензент: Вячеслав Харченко, д.т.н., проф., академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, Национальный аэрокосмический университет им. М. С. Жуковского, Харьков, Украина  
[v\\_s\\_kharchenko@ukr.net](mailto:v_s_kharchenko@ukr.net)

Поступила Декабрь 2017

*Аннотация:* Рассмотрены технологии формирования сигналов, используемых в системах связи и телекоммуникаций, а также приводится краткий анализ перспективных технологий, которые могут найти применение в беспроводных системах связи широкополосного доступа. Показано, что широко используемая схема модуляции OFDM обладает рядом недостатков, которые могут привести к снижению показателей эффективности систем. Представлены альтернативные технологии формирования сигналов, в частности, технология W-OFDM, позволяющие устранить известные недостатки технологии OFDM.

*Ключевые слова:* множественный доступ, сотовая связь, частотное разделение, помехоустойчивость, интерференция, оконная обработка, пик-фактор, модуляция.

## 1 Введение

Современные беспроводные системы (например, спутниковые системы связи, системы мобильной телефонной связи и др.), относятся к многопользовательским системам. При проектировании таких систем основной проблемой является выбор необходимого способа множественного доступа, т. е. возможности одновременного использования многими абонентами данной системы канала связи с минимальным взаимным влиянием [1,2].

Широкополосные сигналы активно используются в современных высокоскоростных системах сотовой связи стандартов WiMax, Mobile WiMax, MBWA, беспроводных дискретных коммуникационных системах, например LTE и Wi-Fi, при передаче информации цифрового телевидения (DVB-T) и радио (DRM, DAB), в системах радиолокации и т.д. Использование сигналов с ортогональным частотным разделением каналов и мультиплексированием (*Orthogonal frequency – division multiplexing, далее - OFDM*), в том числе в указанных системах передачи информации, позволяет повысить не только информационную емкость системы в условиях многолучевого распространения при ограниченной полосе пропускания, но и скорость приема-передачи данных, приблизив её к пропускной способности канала, увеличить скрытность передачи и помехоустойчивость системы.

В настоящее время идут интенсивные процессы развития, исследования и стандартизации технологий для пятого поколения сетей сотовой связи (далее 5G). При этом, наиболее приоритетными задачами данного направления работ считаются: достижение максимальной скорости передачи данных (до 20 Гбит/сек); обеспечение плотности пользовательских устройств (до  $10^6$  устройств/км<sup>2</sup>); предоставление пользователям сервисов сверхнадежной коммуникации с малой задержкой (URLLC) (задержка передачи данных - не более 1 ms) [3,4]. В качестве возможных решений для достижения вышеуказанных характеристик для сетей 5G рассматриваются: - использование спектра в миллиметровом диапазоне [5]; - новые виды модуляции сигналов и методы кодирования; - методы множественного доступа; - усовершенствованные технологии синтеза архитектуры антенн и сетей [5-6]. Помимо этого, заслуживают самого пристального внимания исследования, проводимые в рамках следующих направлений:

- ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов с фильтрованием (F-OFDM) [7-9];
- технология пространственного кодирования сигнала (MIMO) [10];
- облачные сети радиосвязи (CRAN) [11];
- технологии ортогонального частотного разделения каналов с кодированием (C-OFDM) [12] и др.

## 2 Принципы технологии OFDM

Развитие технологий беспроводных коммуникаций постоянно формировалось на основе исследований форм сигналов. В качестве примера можно привести успех четвертого поколения (4G) связи, который базируется, в том числе, на использовании схемы цифровой модуляции OFDM.

Основная идея OFDM состоит в том, что для достижения высокой скорости передачи, в частотной области применяется деление полного диапазона частот сигнала на некоторое число неперекрывающихся частотных подканалов с меньшими скоростями. При этом каждый подканал (поднесущая) модулируется отдельным символом, затем эти каналы мультиплексируются по частоте и данные передаются параллельно по ортогональным подканалам. По сравнению с передачей использующей одну несущую, этот подход обеспечивает повышенную устойчивость к узкополосной интерференции и искажениям в канале связи. Также обеспечивается более высокий уровень «гибкости» системы, так как параметры модуляции, такие как размер созвездия, скорость кодирования, могут быть выбраны независимо для каждого подканала.

В структуру OFDM модема входят передатчик и приемник. В передатчике исходный последовательный поток информационных битов (Рис. 1) кодируется помехоустойчивым кодом (согласно рекомендации LTE 3GPP TS 36.211 используется сверточный турбокод с базовой скоростью 1/3), перемежается (П) и демультимплексируется на N параллельных подпотоков.

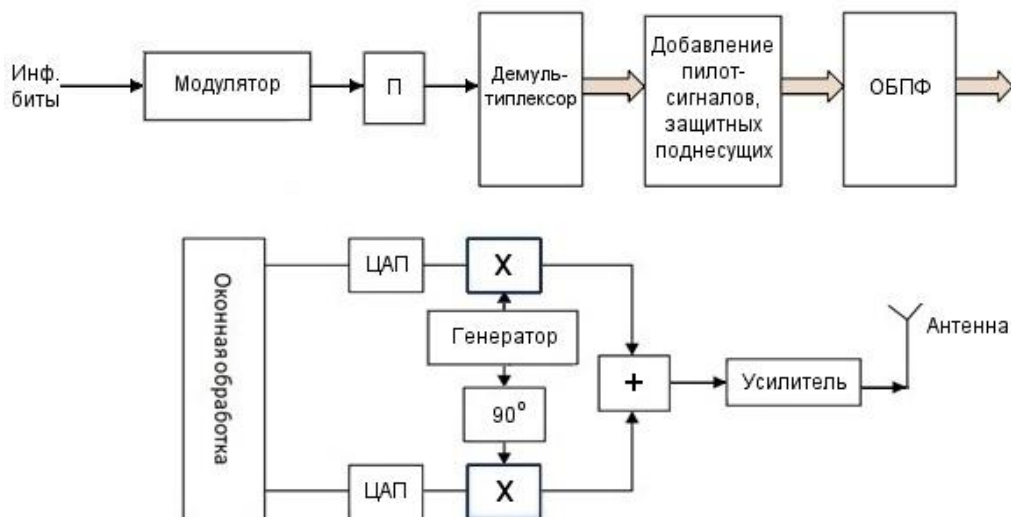


Рисунок 1 – Структурная схема

Далее каждый из потоков отображается в поток символов с помощью процедуры фазовой (BPSK, QPSK, 8-PSK) или амплитудно-фазовой квадратурной модуляции (QAM). При использовании модуляции BPSK получается поток двоичных чисел (1 и -1), при QPSK, 8-PSK, QAM — поток комплексных чисел. Помимо поднесущих, на которых передается информация, существуют служебные поднесущие. К ним 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 под-

несущих, или переменное, изменяющееся от символа к символу OFDM в кадрах. 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.

Процедура умножения на комплексную экспоненту с соответствующей частотой подканала и затем суммирование всех подканалов для формирования OFDM сигнала аналогична операции обратного преобразования Фурье. В связи с этим для формирования требуемого OFDM-символа применяют аппарат быстрого обратного преобразования Фурье (ОБПФ), что значительно упрощает реализацию модуляторов.

Сохранение ортогональности является необходимым для того, чтобы приемник мог правильно распознать информацию на поднесущих. Для этого необходимо выполнить следующие условия: - приемник и передатчик должны быть синхронизированы; - аналоговые компоненты передатчика и приемника должны быть очень высокого качества; - используемый канал передачи данных не должен быть многопутным (многолучевым).

К сожалению, на практике в системах радиосвязи, многолучевое искажение практически неизбежно, что приводит к искажениям полученного сигнала. Для устранения такого рода помех необходимо выбрать защитный интервал, длительность которого больше, чем максимальная задержка распространения в канале передачи. Таким образом, можно компенсировать большинство видов интерференции между каналами (интерференцию между поднесущими) и между смежными блоками передачи (т.е. межсимвольную интерференцию (ISI)). Для уменьшения внеполосного излучения сигналов используется оконная обработка временного сигнала, окном типа «приподнятый косинус».

Далее цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) преобразуют в аналоговый вид отдельно действительную и мнимую компоненты. После прохождения через фильтр нижних частот сигнал поступает на квадратурный смеситель, который переносит полезный спектр OFDM-сигнала на несущую частоту. Далее эти сигналы суммируются, усиливаются, и формируется сигнал OFDM.

Широкое использование цифровой схемы модуляции OFDM обусловлено целым рядом полезных отличительных свойств данной технологии:

- устойчивость к последствиям многолучевого распространения электромагнитных волн; - высокая помехоустойчивость к узкополосным помехам;
- устойчивость к межсимвольной интерференции за счет того, что продолжительность символа во вспомогательной поднесущей значительно больше в сравнении с задержкой распространения, чем в традиционных схемах модуляции;
- высокая спектральная эффективность в сравнении с традиционными системами с частотным разделением каналов за счет большого количества поднесущих;
- возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к конкретным условиям распространения радиосигнала и обеспечить требуемое качество принимаемых сигналов;
- относительная простота реализации необходимых методов цифровой обработки и др.

### **3 Перспективные технологии формирования сигналов в современных мобильных системах телекоммуникаций**

Эффективность современного поколения систем мобильной связи в значительной степени основывается на использовании, в том числе, OFDM модуляции. Однако для обеспечения дальнейшего прогресса и перехода на более совершенные технологии связи пятого поколения необходим пересмотр и совершенствование технологии OFDM, равно как и широкое внедрение других технологий. В этом контексте, следует выделить следующие принципиальные отличия технологии 5G от технологий мобильной коммуникации предыдущего поколения [4-5]:

1. Смешанная нумерология. Одной из целей 5G является обеспечить использование различных сервисов, в частности eMBB, mMTC и URLLC. Предполагается, что технология 5G должна поддерживать более гибкое использование доступной полосы частот для увеличения пропускной способности. Для этого необходимо разработать и внедрить различные варианты использования доступных частотных и временных ресурсов для различных услуг.

2. Ощутимое увеличение пропускной способности – предполагается трехкратный рост эффективности использования спектра сигнала в 5G в сравнении с сервисами eMBB [3]. С целью повышения пропускной способности в сетях 5G предусматривается уменьшить защитные интервалы [4].

3. Поддержка асинхронной передачи данных. В сетях 4G при асинхронной передаче данных базовая станция постоянно синхронизируется с абонентским оборудованием для уменьшения взаимных помех между несущими частотами (*inter-carrier interference – ICI*) [4]. При этом потери, вызванные такими помехами, негативно сказываются на различных сервисах, в частности mMTC, которые связаны с массовым подключением абонентов сети. Поддержка сетями 5G асинхронной передачи данных направлена на решение проблем, связанных с ICI и обеспечение работы при множественных подключениях [4].

Как уже отмечалось выше, ортогональное частотное уплотнение (OFDM) - это схема доступа, которая используется в современных сетях 4G. Для обеспечения доступа к сети используются два отдельных сигнала - сигнал OFDM в нисходящем канале и сигнал множественного доступа с частотным уплотнением и одной несущей (SC-FDMA) в восходящем канале. Преимущества данной схемы связаны с возможностью передачи сигналов на множестве несущих. Данная схема (OFDM) имеет целый ряд недостатков, в частности:

- высокую чувствительность к частотным сдвигам и сдвигам тактовой частоты; – высокое отношение пикового уровня мощности сигнала к среднему пик-фактору (PAPR);
- снижение спектральной эффективности ввиду использования защитных интервалов;
- чувствительность к эффекту Доплера;
- перекрытие полос поднесущих, приводящие к появлению межбитовой интерференции;
- чувствительность к нелинейностям усилителей и смещению постоянной составляющей при использовании быстрого преобразования Фурье.

Кроме того, чувствительность к частотным сдвигам и сдвигам тактовой частоты обуславливает необходимость периодического добавления сигналов синхронизации в общий объем используемых сигналов и требует синхронизации работы устройства и сети перед началом сеанса связи (обмена данными). А отсутствие непрерывности (фазовый переход) между двумя символами во время генерации символов OFDM инициирует спектральные скачки в частотной области, что приводит к интенсивным внеполосным излучениям.

Ограниченные возможности сигналов на основе схемы OFDM модуляции стали предпосылкой для продолжения исследований с целью выбора кандидатов сигналов для последующих поколений (стандартов) сетей мобильной связи, в частности 5G. В связи с этим, одной из актуальных задач, подлежащих решению, является выполнение требования существенного сокращения задержки при введении в перечень услуг перспективных сетей связи новых служб и приложений. Наряду с этим, появляется необходимость в формировании циклического префикса и уменьшении длительности символов. Эти соображения привели к созданию целого ряда технологий формирования сигналов:

- с обобщенным частотным уплотнением (GFDM);
- с несколькими несущими на базе набора фильтров (FBMC);
- OFDM с временным разделением (w-OFDM);
- универсальный фильтруемый сигнал с несколькими несущими (UFMC);
- ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов с фильтрованием F-OFDM и др.

Также проводятся исследования новых схем множественного доступа, в том числе: множественного доступа с разреженным кодом (SCMA), неортогонального множественного доступа (NOMA) и множественного доступа с распределением ресурсов (RSMA).

Технология UFMC [13], в значительной степени, рекомендована для преодоления проблемы интерференции (ICI) при множественном доступе пользователей в режиме асинхронной передачи и основана на частотном разделении и мультиплексировании посредством применения операции фильтрации группы поднесущих. UFMC является обобщенной версией техники фильтрования множества боковых полос (БП). Боковые полосы обрабатываются фильтром одновременно, вместо обработки каждой БП в отдельности. Таким образом уменьшаются взаимные помехи для БП в сравнении с традиционным OFDM. Также, применение операций фильтрации БП нацелено на увеличение эффективности ряда приложений коммуникаций, например, таких как системы с сверхмалой задержкой пакетов. Данный вид модуляции оказывается более предпочтительным для подобных приложений по отношению к схеме модуляции FBMC.

FBMC является одним из наиболее известных форматов модуляции с расширением спектра в беспроводных коммуникациях [14]. Данная модуляция обеспечивает значительное преимущество в формировании каждой поднесущей и облегчает гибкое использование спектрального ресурса, позволяет удовлетворить различным системным требованиям, таким как низкая задержка, множественный доступ и другие, что приводит к улучшению показателей помехозащищенности системы в условиях рассеивания сигнала во временной и частотной областях [15]. Так, например прямоугольные фильтры более предпочтительны для каналов, распределенных во времени, в то время как фильтр с характеристикой типа «приподнятый косинус» более устойчив против частотного рассеивания. Однако, несмотря на все очевидные выгоды, получаемые при использовании FBMC, значительная длина фильтров приводит к возникновению следующих последствий: – большой длительности символа, что является проблемой не только для приложений с требованиями малой задержки или большим количеством пользователей в коммуникациях; – увеличению вычислительной сложности для технологии MIMO детектирования. Указанные обстоятельства, в конечном итоге, ведут к проблемам в работе всех основных приложений 5G.

GFDM является блоковой схемой модуляции с частотным уплотнением каналов, разработанной для работы с разнообразными приложениями 5G, обеспечивая изменяемую форму сигнала [16]. Для улучшения показателей надежности и задержки в коммуникациях без коррекции ошибок, можно использовать GFDM сигналы вместе с преобразованием Уолша-Адамара. При комбинировании GFDM с квадратурной амплитудной модуляцией, в системах с множественным доступом, решается проблема внутрисистемных помех при условии использования неортогональных фильтров. С другой точки зрения, GFDM можно рассматривать в качестве схемы с гибкой настройкой отдельных блоков, а не только лишь одной несущей в целом. При манипуляции соответствующих параметров сигнала GFDM, возможно получение различных форм сигнала таких как OFDM, частотное выравнивание с единой несущей (SC-FDE) и др. Несмотря на весьма перспективные возможности, которые открываются благодаря применению сигналов с GFDM, данный вид модуляции является вычислительно сложным [16].

F-OFDM применяется к каналу нисходящей линии связи 4G. Для F-OFDM сконфигурированный фильтр применяется к символу OFDM во временной области для снижения уровня внеполосного излучения сигнала поддиапазона, сохраняя ортогональность комплексных доменов OFDM-символов. Поскольку полоса пропускания фильтра соответствует полосе пропускания сигнала, затрагиваются только несколько поднесущих, близких к краю. Основное соображение заключается в том, что длина фильтра может превышать длину циклического префикса для F-OFDM [6]. При этом снижается уровень межсимвольной интерференции, что обусловлено выбранной конструкцией фильтра с использованием оконной обработки (с мягким усечением). Генерация F-OFDM сигнала основана на формировании блока из  $M$  близлежащих БП в ряде последовательных OFDM символов [17]. В частности, во время обработки каждого символа, в передатчике формируются параметры: значение размерности обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) равное  $N$ , длительность  $M$  «информационных символов» вместе с циклическим префиксом, где  $N > M$ . Информационные символы могут быть

точками созвездий (*constellation points*) как в OFDM. Аналитически указанное можно представить в следующем виде:

$$s(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l(n - l(N + Ng)) \quad (1)$$

и

$$S_l(n) \equiv \sum_{m=m'}^{m'+M-1} d_{l,m} e^{j2\pi m n / N}, -N_g \leq n < N, \quad (2)$$

где  $N_g$  – длина циклического префикса (CP),  $d$  – информационный символ поднесущей  $m$  OFDM системы,  $L$  обозначает количество OFDM символов, а  $\{m_0, m_{0+1}, \dots, m_{0+M-1}\}$  – выбранный набор поднесущих. Сигнал F-OFDM формируется при обработке сигнала  $s(n)$  с помощью соответствующего фильтра, т.е.

$$\tilde{s}(n) = s(n) * f(n). \quad (3)$$

Пропускная способность фильтра равна сумме пропускной способности выбранных БП, а временные затраты – это длительность символа OFDM. В приемнике полученный сигнал сначала проходит через фильтр  $f(-n)$ , который идентичен фильтру передатчика. Принятый сигнал обрабатывается с использованием стандартных OFDM преобразований, а затем отфильтрованный сигнал разделяется на последовательность отдельных OFDM символов с удалением циклического префикса. При этом к каждому символу применяется БПФ размерности  $N$  и далее выделяют информационные символы из соответствующих поднесущих.

Фильтр для F-OFDM должен удовлетворять следующим критериям: иметь плоскую полосу пропускания по поднесущим в поддиапазоне; иметь острую переходную полосу для минимизации защитных полос. Данные критерии соответствуют фильтру с прямоугольным частотным откликом. Чтобы удовлетворять указанным требованиям, фильтр нижних частот реализуется с помощью «окна», которое эффективно обрезает импульсную характеристику и обеспечивает плавные переходы к нулю на обоих концах [18]. Таким образом, реализация F-OFDM приносит дополнительно, к существующей процедуре обработки CP-OFDM, этап фильтрации, причем, как на стороне передачи, так и на стороне приема.

Технология W-OFDM. Для уменьшения внеполосного излучения сигналов используется оконная обработка временного сигнала, окном типа «приподнятый косинус». Известно, что спектр OFDM сигнала имеет множество боковых лепестков, которые медленно затухают в частотной области, что приводит к увеличению внеполосного излучения. Для снижения внеполосного излучения OFDM-символа используют защитные поднесущие, которые добавляются по краям OFDM сигнала. С этой же целью применяется оконная обработка сигнала. Такая обработка сигнала позволяет осуществлять плавный переход между окончанием предыдущего и началом последующего символа. Такой переход осуществляется с помощью перекрытия во времени префикса текущего символа и суффиксом предыдущего символа посредством их суммирования. Окно «приподнятый косинус» имеет вид

$$h(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\beta)}{2}; \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \left[ \frac{\pi}{\beta+T} \left( |t| - \frac{T(1-\beta)}{2} \right) \right] \right), \frac{T(1-\beta)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\beta)}{2}; \\ 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T$  – длительность символа,  $\beta$  – спад, принимающий значения в интервале от 0 до 1.

Для данной технологии важным является выбор длительности окна спада. Значение длительности окна приподнятого косинуса необходимо выбирать равной или меньшей длительности циклического префикса. В этом случае применение оконной обработки для формирования символов OFDM позволяет значительно снизить внеполосное излучение. Кроме того, на уровень внеполосного излучения оказывает влияние и выбор защитного интервала между

поднесущими. Так, например, как утверждает группа исследователей в работе [19], чем длиннее защитный интервал, тем меньше уровень внеполосного излучения.

#### 4 Выводы

В работе представлен краткий обзор технологий формирования сигналов, используемых в современных системах связи и телекоммуникаций, а также проведен анализ перспективных технологий, которые, потенциально могут найти свое применение в перспективных системах, в том числе беспроводных системах связи широкополосного доступа.

Подчеркнуто, что широко известная схема модуляции OFDM имеет ряд недостатков, которые могут привести к снижению показателей эффективности систем, в которых она применяется. К основным из недостатков следует отнести:

- снижение помехоустойчивости приема сигналов, обусловленное воздействием межсимвольных и межканальных помех;
- OFDM сигнал имеет относительно высокое значение пик-фактора, что приводит к чрезмерным энергетическим затратам.

Рассмотрены известные альтернативные технологии формирования сигналов, в частности, технология формирования сигналов, основанная на оконной обработке сигналов, обеспечивающая низкий уровень внеполосных излучений.

#### Ссылки

- [1] Gorbenko I.D., Zamula A.A., Semenko Ye.A. Ensemble and correlation properties of cryptographic signals for telecommunication system and network applications // *Telecommunications and Radio Engineering*. - Volume 75, 2016 Issue 2, pages 169-178.
- [2] I.D. Gorbenko, A.A. Zamula Cryptographic signals: requirements, methods of synthesis, properties, application in telecommunication systems *Telecommunications and Radio Engineering*. - Volume 76, 2017 Issue 12, pages 1079-1100.
- [3] ITU-R, Recommendation M.2083-0, "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", ITU recommendation, Sept. 2015.
- [4] Pen Guan et. al., "5G Field Trials: OFDM-Based Waveforms and Mixed Numerologies" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1234-1243, March 2017.
- [5] T. S. Rappaport, et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [6] J.G. Andrews, et al., "What will 5G be?", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014.
- [7] J. Abdoli, et al., "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems", *Proc. IEEE SPAWC*, pp. 66-70, Jun. 2015.
- [8] X. Zhang, et al., "Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in The 5th Generation Cellular Networks", *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Dec. 2015.
- [9] Li, Jialing, et al., "A resource block based filtered OFDM scheme and performance comparison", *Proc. IEEE ICT*, pp. 1-5, May 2013.
- [10] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [11] China Mobile Research Institute, "C-RAN: The Road Towards Green RAN", white paper, 2011. [Online]. Available: <http://labs.chinamobile.com/cran/>.
- [12] H. Nikopour, et al., "Sparse code multiple access", *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 332-336, Sept. 2013.
- [13] 5G Forum. (2016, Mar.). 5G white paper: 5G vision, requirements, and enabling technologies [Online]. Available: <http://kani.or.kr/5g/whitepaper/5G%20Vision,%20Requirements,%20and%20Enabling%20Technologies.pdf>
- [14] B. Farhang Boroujeny, "Filter bank multicarrier modulation: a waveform candidate for 5G and beyond," *Advances in Electrical Engineering*, vol. 2014, Dec. 2014. doi:10.1155/2014/482805.
- [15] Zekeriyya Esat Ankarali et. al., "Enhanced OFDM for 5G RAN", June 2017, doi: 10.3969/j. issn. 1673-5188. 2017. S1. 002.
- [16] A. Şahin, I. Güvenç and H. Arslan, "A survey on multicarrier communications: prototype filters, lattice structures, and implementation aspects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1312-1338, Aug. 2014. doi:10.1109/SURV.2013.121213.00263
- [17] Huawei and HiSilicon, "f-OFDM scheme and filter design," 3GPP Standard Contribution (R1-165425), Nanjing, China, May 2016".
- [18] R1-165425. "F-OFDM scheme and filter design." 3GPP TSG RAN WG1 meeting 85. Huawei; HiSilicon. May 2016.
- [19] V.P. Fedosov, D.G. Kovtun, A.A. Legin, A.V. Lomakina *Issledovanie modeli OFDM signala s malym urovnem vnepolosnogo izlucheniya / Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2016, S. 6-16.

**Reviewer:** Vyacheslav Kharchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of Applied Radio Electronics, National Aerospace University named after. M. E. Zhukovsky, Kharkiv, Ukraine.  
E-mail: [v\\_s\\_kharchenko@ukr.net](mailto:v_s_kharchenko@ukr.net)

Received: December 2017

**Authors:**

Zamula Alexandr, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies Security, V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine.

E-mail: [zamy1aaa@gmail.com](mailto:zamy1aaa@gmail.com)

Morozov Vladislav, postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies Security, V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine.

E-mail: [morozov@boiko.com.ua](mailto:morozov@boiko.com.ua)

**Methods for forming and processing OFDM signals in modern wireless discrete communication systems.**

**Abstract.** The considers technologies of signal generation used in communication and telecommunication systems, as well as provides a brief analysis of promising technologies that can be used in wireless broadband access communication systems. It is shown that the widely used OFDM modulation scheme has a number of shortcomings that can lead to a decrease in the system efficiency indicators. Are presented alternative signal generation technologies, in particular, technology W-OFDM, which eliminate the known shortcomings of OFDM technology.

**Keywords:** multiple access, cellular communication, frequency separation, noise immunity, interference, window processing, peak factor, modulation.

**Рецензент:** Вячеслав Харченко, д.т.н., проф., академік Академії наук прикладної радіоелектроніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського, Харків, Україна.

E-mail: [v\\_s\\_kharchenko@ukr.net](mailto:v_s_kharchenko@ukr.net)

Надійшло: Грудень 2017.

**Автори:**

Олександр Замула, доктор технічних наук, професор кафедри безпеки інформаційних систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: [zamy1aaa@gmail.com](mailto:zamy1aaa@gmail.com)

Владислав Морозов, аспірант кафедри безпеки інформаційних систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: [morozov@boiko.com.ua](mailto:morozov@boiko.com.ua)

**Методи формування і обробки OFDM сигналів в сучасних бездротових дискретних комунікаційних системах.**

**Анотація.** У статті розглянуті технології формування сигналів, використовуваних в системах зв'язку і телекомунікацій, а також наводиться короткий аналіз перспективних технологій, які можуть знайти застосування в бездротових системах зв'язку широкопasmового доступу. Показано, що широко використовувана схема модуляції OFDM має низку недоліків, які можуть призвести до зниження показників ефективності систем. Представлені альтернативні технології формування сигналів, зокрема, технологія W-OFDM, що усувають відомі недоліки технології OFDM.

**Ключові слова:** множинний доступ, стільниковий зв'язок, частотне розділення, завадостійкість, інтерференція, віконна обробка, пік-фактор, модуляція.