

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАДИОСИГНАЛОВ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ СЕТЕЙ 6G

Барбошин А. Ю.¹, Лучин Д. В.², Маслов Е. Н.³

DOI: 10.21681/2311-3456-2024-4-45-56

Цель исследования: Исследовать технологические возможности различных сигнальных конструкций (СК) радиосигналов для выявления типов, способных наиболее полно обеспечить функциональность систем связи 6G.

Методы исследования: Системный анализ параметров перспективных вариантов СК в направлении обеспечения расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB), сверхнадежной связи с ультрамалыми задержками (URLLC) и массовой связи межмашинного типа (mMTC), эффективных по показателям уровня внеполосных излучений (OOBE), пик-фактора (PAPR), совместимости с MIMO, при обеспечении высокоскоростной передачи данных множественного доступа и одновременного сканирования стохастического радиоканала с частотно-временным рассеянием (ISAC/DFRC).

Полученные результаты: Определена технологичность СК, как способность наиболее полно обеспечить установленные показатели качества и требуемые сценарии связи, при максимальной унификации структуры сигнала и алгоритмов его обработки. Предложена методология исследования технологических возможностей СК с точки зрения эффективности их применения в 6G. Получены оценки и классифицированы технологические возможности различных вариантов СК с множественной несущей типа OFDM и с одной несущей (SC), включая СК типа DFT-s-OFDM. Показано, что сигнал множественной несущей технологии CP-OFDM имеет высокие показатели OOBE и PAPR, а способы улучшения этих параметров не технологичны, поскольку реализуются посредством сложных и специфических технических решений. Показано, что сигнал одиночной широкополосной несущей технологии DFT-s-OFDM по определению обладает низким показателем PAPR и посредством процедуры спектрального прекодирования обеспечивает гибкость программного управления параметрами сигнальной конструкции сообразно различным сценариям связи в системах 6G, использующих типовые приемопередатчики DFT-s-OFDM.

Научная новизна: Согласно предложенной методологии исследования технологических возможностей СК, получен вывод о том, что по критериям установленных требований, технологичность использования в перспективных сетях 6G СК типа CP-OFDM уступает технологичности применения СК типа DFT-s-OFDM, обладающей, благодаря SDR-процедуре спектрального прекодирования, гибкостью адаптации унифицированной структуры сигнала к широкому спектру применений по требуемым сценариям связи.

Ключевые слова: Функционал и требования 6G, технологичность сигнальной конструкции, сравнение технологичности применения в 6G CP-OFDM и DFT-s-OFDM.

ANALYSIS REQUIREMENTS OF APPLICATION AND TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF RADIO SIGNALS, PROMISING FOR 6G NETWORKS

Baraboshin A. Y.⁴, Luchin D. V.⁵, Maslov E. N.⁶

Purpose of the study: To investigate the technological capabilities of various signal constructions (SC) of radio signals in order to identify the types that can most fully provide functionality of 6G communication systems.

Research methods: System analysis of the parameters of promising SC options in the direction of providing enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-reliable Low-Latency Communication (URLLC) and massive Machine Type of Communication (mMTC) in terms of minimization Out-of-Band Emission (OOBE), Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), compatibility ensuring

- 1 Барбошин Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории филиала ФГБУ НИИР – СониИР, г. Самара, Россия. E-mail: bay@soniir.ru
- 2 Лучин Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, директор научно-технического центра филиала ФГБУ НИИР – СониИР, г. Самара, Россия. E-mail: dmyl@soniir.ru
- 3 Маслов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала ФГБУ НИИР – СониИР, г. Самара, Россия. E-mail: maslov@soniir.ru
- 4 Andrey Yu. Baraboshin, Ph.D., Head of the Laboratory of the Branch of the Federal State Budgetary Institution NIIR – SONIIR, Samara, Russia. E-mail: bay@soniir.ru
- 5 Dmitry V. Luchin, Ph.D., Director of the Scientific and Technical Center of the Branch of FSBI NIIR – SONIIR, Samara, Russia. E-mail: dmyl@soniir.ru
- 6 Evgeny N. Maslov, Ph.D., Leading Researcher of the Branch of the Federal State Budgetary Institution NIIR – SONIIR, Samara, Russia. E-mail: maslov@soniir.ru

with MIMO, taking into account the need to provide high-speed data transmission of multiple access and simultaneous sensing/radarizing stochastic of radio channel with time-frequency dispersing (ISAC/DFRC).

Results obtained: The technological ability of the SC is defined as the ability to most fully ensure the established quality indicators and the required communication scenarios, with maximum unification of the signal structure and algorithms for its processing. A methodology for researching the technological capabilities of SC in terms of the effectiveness of their application in 6G is proposed. Estimates have been obtained and the technological capabilities of various variants of SC with multiple carrier type OFDM and with single carrier (SC), including SC type DFT-s-OFDM, have been classified. It is shown that the signal of the CP-OFDM multiple carrier technology has high OOBЕ and PAPR values, and the ways to improve these parameters are not technological ability, since they are implemented through difficult and specific technical solutions. It is shown that the signal of a single broadband carrier technology DFT-s-OFDM, by definition, has a low PAPR index and, through the spectral precoding procedure, provides flexibility to software control of the parameters of the signal structure in accordance with various communication scenarios in 6G systems using typical transmitters DFT-s-OFDM.

Scientific novelty: According to the proposed methodology for studying the technological capabilities of SC, it was concluded that, in accordance with the criteria of established requirements in promising 6G networks, the technological ability of using SC CP-OFDM is inferior to the technological ability of using SC DFT-s-OFDM, which, thanks to the procedure of spectral preliminary coding, has the flexibility of adapting (SDR) its unified structure to a wide range of application, according to the required communication scenarios.

Keywords: Functional and requirements of 6G, technological ability of signal constructions, comparison technological ability's of application in 6G CP-OFDM and DFT-s-OFDM.

Введение

Планируется, что технологической основой информационной базы эффективной цифровой экономики России будут сети беспроводной связи шестого поколения (6G). Для конструктивного обеспечения разработок устройств телекоммуникаций и систем указанных сетей необходимо детальное исследование проблем и особенностей их построения. В первую очередь, разработчики оборудования должны быть обеспечены рекомендациями и стандартами, определяющими структуру рабочего радиосигнала указанной сети, в полной мере отвечающего условиям и задачам её функционирования. Таким образом, анализ технологических возможностей радиосигналов, перспективных для применения в сетях 6G, представляет собой научную задачу, актуальную для формирования практических рекомендаций по созданию сигнальной базы отечественной системы беспроводной связи указанного поколения.

Постановка цели исследования

Целью проведенного анализа являлось исследование технологических возможностей различных сигнальных конструкций (СК) – комбинаций способов модуляционного и помехоустойчивого кодирования радиосигналов для выявления типов, способных наиболее полно обеспечить функциональность системы связи 6G.

Методология исследования

Современные реалии характеризуются появлением новых пользовательских приложений, таких как видео высокой четкости, мультимедиа с эффектом присутствия и т.п., основанных на применении расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB). Также наблюдается смещение тренда

информационного обслуживания в сторону обеспечения интернета вещей (NB-IoT) и всеобъемлющего интернета (IoE), – т.е. в направлении организации автоматического обмена данными роботами (D2D) и беспилотных транспортных средств (V2X) [1].

Соответственно потребностям новых приложений, консорциум 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project), начав в 2015 году в рамках ITU (International Telecommunication Union)⁷ продвижение спецификаций проектов 5G/6G NR, определил следующие основные направления применения радиосигналов указанной системы:

- ❖ расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB);
- ❖ сверхнадежная связь с низкой задержкой (URLLC);
- ❖ массовая связь межмашинного типа (mMTC).

Также стандартами консорциума 3GPP, несмотря на принципиальные различия технических характеристик обслуживаемых приложений, для унификации и удешевления используемого оборудования отмечалась целесообразность обеспечения совместимости технологий формирования сигналов действующих в настоящее время (3G HSPA/UMTS, 4G LTE/VoLTE) и перспективных систем беспроводной связи (5G/6G NR). Заметим, что в настоящее время стандарты 3GPP по системам 6G NR находятся в стадии разработки.

Эффективность работы указанных выше приложений критически зависит от пропускной способности канала связи и требует от перспективных типов

⁷ International Telecommunication Union (ITU). IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. – Geneva, Switzerland. : ITU-R, 2015. – p. 21.

радиосигналов обеспечения передачи данных на сверхвысоких скоростях и при критически ультрамалых задержках.

По определению указанные свойства радиосигнала, в первую очередь обеспечиваются выбором диапазона рабочих частот. В дополнение к диапазону миллиметровых длин волн [2], 6G впервые будет использовать терагерцовый (ТГц) диапазон или даже видимый свет, обеспечивающие использование сверхширокой полосы пропускания сигналов, превышающей десятки ГГц. Благодаря этому сеть 6G будет обладать беспрецедентной скоростью беспроводной передачи данных (до десятков Тбит/с) с ультрамалыми задержками.

Однако указанные диапазоны частот рабочих волн имеют известные особенности характеристик распространения сигналов [3], включая наличие селективных замираний или деградации некоторых областей полосы частот рабочего диапазона, снижающие эффективность работающих в этих условиях радиосистем и затрудняющие их реализацию.

Соответственно установленным задачам и условиям определим параметры СК радиосигнала, имеющие принципиально важное значение для его применения в сети 6G.

Оценивая технологические возможности перспективных типов радиосигналов, в первую очередь необходимо отметить их способность гибко адаптироваться к стохастическим изменениям радиоканала и противостоять деструктивному воздействию мультипликативных искажений, аддитивных шумов и помех.

Для организации принципиально необходимого для обеспечения указанной адаптации сканирования канала связи и одновременной передачи по каналу информационных данных, желательно использовать один и тот же сигнал (ISAC/DFRC).

Форма сигнала и схема модуляции должны обеспечивать надежную работу системы в условиях канала с частотно-временным рассеянием (многолучевость, эффект Допплера).

Для обеспечения требуемой скорости и минимизации задержки передачи данных должны быть достигнуты высокие показатели спектральной эффективности и скорости обработки сигнала⁸, в том числе за счет низкой вычислительной сложности алгоритмов обработки.

Новые формы сигналов должны обеспечивать хорошую совместимость с технологией системы много входов – много выходов (MIMO), являющейся эффективным средством повышения скорости передачи

данных в ограниченной полосе, т.е. создающей возможность использования запаса пропускной способности, как для повышения устойчивости связи в условиях стохастического радиоканала со множеством препятствий и помех, так и для организации множественного доступа.

Для обеспечения высокой спектральной плотности каналов большого числа разнообразных потребителей, СК должна обладать низким уровнем побочных, внеполосных излучений (OOBE).

Для обеспечения высокой энергоэффективности канального сигнала, пригодного для применения в недорогих передающих устройствах с простыми усилителями мощности, обладающими существенной нелинейностью и ограниченным энергоресурсом, структура СК должна иметь низкий показатель пик-фактора (PAPR).

При этом желательно, чтобы СК имела унифицированную структуру для нисходящего, восходящего и прямого каналов.

Таким образом, установлено, что вследствие достаточной противоречивости выявленных требований, возможно не существует варианта СК, обеспечивающего их одновременное выполнение. Однако, возможен поиск её настраиваемой структуры, обеспечивающей в широком спектре вариантов использования, включая eMBB, mMTC и URLLC, достаточный компромисс, например, между требованиями спектральной и энергетической эффективности и т.п.

Предваряя анализ, отметим, что решение задачи оценки скорости и соответствующей задержки передачи данных в зависимости от ширины рабочей полосы частот радиоканала используемого диапазона, является общеизвестным. Поэтому далее, на этом аспекте анализа и оценки перспективных типов радиосигналов останавливаться не будем, также как и на оценке влияния на величину задержки передачи данных скорости работы вычислительных средств, используемых для реализации алгоритмов обработки. Основное внимание уделим вопросам анализа аспектов технологии модуляции и формирования перспективного радиосигнала. При этом под технологичностью СК будем понимать её способность наиболее полно обеспечить установленные показатели качества и требуемые сценарии связи при максимальной унификации структуры сигнала и алгоритмов его обработки.

Результаты исследования сигналов множественной несущей

Партнерский проект 3GPP преимущественно предполагает использование в 5G/6G NR многочастотного сигнала множественной несущей, полученного посредством ортогонального мультиплексирования

⁸ 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Study on requirements for NR beyond 52.6 GHz. Technical Report (TR) 38.807, Jan. 2020, version 16.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3522>.

с частотным разделением и циклическим префиксом (CP-OFDM)⁹:

$$\hat{d}(n \cdot T_0 / N) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} D_k \cdot e^{j2\pi \frac{k}{N} n}, \quad n \in [1, N], \quad (1)$$

где: N – размерность обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ); $\{D_k\}_{k=0}^{N-1}$ – «частотные» представления комплексных символов данных PSK/QAM модуляции; $e^{j2\pi \frac{k}{N} n}$ – частотный фактор k -го коэффициента Фурье для символа D_k ; $T_0 = 1 / (f_{k+1} - f_k)$ – интервал ортогональности сигналов N поднесущих множественной несущей; $n \cdot T_0 / N = t_n$ – моменты котельниковских отсчетов.

После завершения формирования согласно (1) отсчетов информационного сигнала на интервале ортогональности T_0 , на каждом такте сигнала CP-OFDM формирование отсчетов полного символического интервала $T_c = T_0 + T_{su}$ завершается генерацией L отсчетов сигнала активного защитного интервала (циклического префикса) $T_{su} = L \cdot T_0 / N$, по правилам:

$$\hat{d}(t_n) = \hat{d}(t_n - T_0), \text{ или } \hat{d}(t_n) = -\hat{d}(t_n - T_0), \\ \text{для } t_n = n \cdot T_0 / N \text{ и } n \in [N+1, N+L].$$

Введение CP обеспечивает противодействие СК межсимвольной интерференции (ISI), порожденной каналом с рассеянием.

Согласно представленной структуре, CP-OFDM сигнал обладает высокой спектральной эффективностью и за счет введения CP обладает необходимыми корреляционными свойствами, используемыми для синхронизации и когерентного фазирования процесса передачи данных, а также для организации сканирования и адаптивной коррекции канала. Отметим, что для повышения качества сканирования и коррекции в состав СК CP-OFDM могут быть введены пилот-сигналы, ортогональные сигналам информационных поднесущих и существенно упрощающие реализацию указанных функций сканирования и частотно-фазовой коррекции канала.

Наконец, ортогональная структура СК CP-OFDM, за счет разделения каналов передачи данных, технологически, хорошо сочетается с процедурой частотно-временного кодирования и пространственной обработки сигнала согласно технологии MIMO.

Однако, такие недостатки сигнала CP-OFDM, как высокие показатели OOBЕ и PAPR, подвигают разработчиков на поиск решений, улучшающих указанные параметры. Рассмотрим процедуры таких решений подробнее.

Известно, что высокий показатель OOBЕ сигнала CP-OFDM является следствием наличия в нём резких межсимвольных переходов, обусловленных скачками

фаз сигналов поднесущих при их модуляции и соответственно длинными «хвостами» спектральных представлений множественных поднесущих, ортогональных в нулях, но пульсирующих за пределами их группового прямоугольного спектра.

На (рис.1) классифицированы способы снижения показателя OOBЕ сигнала CP-OFDM.

Ограничение группового спектра сигнала CP-OFDM посредством фильтрации впервые использовалось в технологии LTE для улучшения параметров сигнала в режиме пакетной передачи данных.

Согласно процедурам фильтрации спектра F-OFDM¹⁰ и универсальной фильтрации UFMС¹¹, для подавления внеполосного излучения применяются поддиапазоновые фильтры, а согласно процедуре FBMC-OQAM¹² сигнал каждой поднесущей фильтруется индивидуально гребенчатым фильтром.

В отличие от схем частотной обработки спектра, процедуры оконной обработки осуществляются во временной области. В варианте W-OFDM¹³ процедура свёртки сигнала с непрямоугольным окном применяется для сглаживания переходов между последовательными OFDM символами, а в варианте WCC-FBMC-OQAM¹⁴ круговая (периодическая) свертка используется для удаления «хвостов» гребенчатой фильтрации.

В одном ряду с рассмотренными способами «сглаживания» модуляционных скачков находится также и способ управления непосредственно формой модулирующего импульса. Так, согласно процедуре NOFDM¹⁵ осуществляется коррекция прямоугольной формы импульсов модуляции, а в варианте P-OFDM¹⁶

9 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 38.211 V15.7.0. In Technical Specification Group Radio Access Network. Physical Channels and Modulation (Release 15). – Newport Beach, CA, USA, 2019.

- 10 Demir A.F., Elkourdi M., Ibrahim M., Arslan H. Waveform Design for 5G and Beyond. In 5G Networks. Fundamental Requirements, Enabling Technologies and Operations Management. – Hoboken, NJ, USA. : John Wiley&Sons Inc, 2018. – pp. 51–76;
- Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM Inspired Waveforms for 5G // IEEE Commun. Surv. Tutor. – 2016, 18. – pp. 2474–2492;
- Abdoli J., Jia M., Ma J. Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems // In Proc. 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). – IEEE, 2015. – pp. 66–70;
- Zhang X., Jia M., Chen L., Ma J., Qiu J. Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks // In Proc. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – IEEE, 2015. – pp. 1–6.
- 11 Schaich F., Wild T. Waveform contenders for 5G OFDM vs. FBMC // In Proc. 2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). – IEEE, 2014. – pp. 457–460.
- 12 Schaich F. Filterbank based multi carrier transmission (FBMC) evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX // In Proc. 2010 European Wireless Conference (EW). – IEEE, 2010. – pp. 1051–1058.
- 13 Huawei and HiSilicon. Waveform evaluation updates for case 4. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) RAN1 (R1) 166091, Aug. 2016. https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg1_r1/TSGR1_86/Docs/.
- 14 Abdoli M. J., Jia M., Ma J. Weighted circularly convolved filtering in OFDM/OQAM // In Proc. 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE, 2013. – pp. 657–661.
- 15 Kozek W., Molisch A. F. Nonorthogonal pulses shapes for multicarrier communications in doubly dispersive channels // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1998. – vol. 16. – no. 8. – pp. 1579–1589.
- 16 Zhao Z., Schellmann M., Wang Q., Gong X., Boehnke R., Xu W. Pulse shaped OFDM for asynchronous uplink access // In Proc. 2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. – IEEE, 2015. – pp. 3–7.



Рис. 1. Способы снижения внеполосного излучения (ООБЕ) сигнала CP-OFDM

форма импульсов проектируется (в том числе и для случая использования гребенчатого фильтра – FB-OFDM¹⁷), в целях обеспечения более резкого затухания спектра модулированного сигнала за пределами рабочей полосы.

Рассмотренные варианты обеспечивают снижение уровня внеполосного излучения сигнала технологии CP-OFDM.

Однако при этом, как при использовании линейной свертки со взвешивающим окном, так и при управлении формой импульса модуляции, значительная часть циклического префикса активного защитного интервала символа занимается отсчетами расширения границ символов, что снижает показатель устойчивости СК CP-OFDM к межсимвольной интерференции (ISI). В случае же обработки спектра множественного сигнала фильтрами, особенно гребенчатым, вследствие неравномерности характеристик АЧХ и ГВЗ фильтров, происходит нарушение ортогональности сигналов OFDM-поднесущих, что приводит к увеличению из взаимных помех (ICI).

Радикальным вариантом использования для снижения ООБЕ неортогональности сигналов поднесущих является подход, направленный на повышение компактности спектра сигнала множественной несущей посредством уменьшения частотного разноса его поднесущих, вплоть до значения менее ширины полосы каждого парциального сигнала. Так, для сигналов поднесущих применяется обобщенное

мультиплексирование с частотным разделением GFDM¹⁸, мультиплексирование с частотным разделением и перекрытием парциальных спектров OVFDM¹⁹, спектрально-эффективное (с перекрытием) мультиплексирование с частотным разделением SEFDM [4]. Представленные технологии обеспечивают существенное снижение ООБЕ при контролируемом уровне ICI, но при этом, за счет нарушения ортогональности парциальных каналов передачи данных существенно усложняется их обработка при демодуляции и соответственно затрудняется использование таких сигналов в системах MIMO.

Отдельный класс исследований направлен на изучение возможностей использования при формировании многочастотного сигнала для улучшения его параметров преобразований, отличных от классического БПФ/ОБПФ (FFT/IFFT). К данному классу относятся технологии: FRFT-OFDM²⁰ на основе дробного преобразования Фурье; AFT-OFDM²¹ на основе аффинного преобразования Фурье; DWTOFDM²² – мультиплексирование с частотным разделением

17 Yu X., Guanghui Y., Xiao Y., Zhen Y., Jun X., Bo G. FB-OFDM: A novel multicarrier scheme for 5G // In Proc. 2016 IEEE European Conference on Networks and Communications (EuCNC). – IEEE, 2016, – pp. 271–276.

18 Michailow N., Matthé M., Gaspar I. S., Caldevilla A. N., Mendes L. L., Festag A., Fettweis G. Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks // IEEE Transactions on Communications. – 2014. – vol. 62. – no. 9. – pp. 3045–3061.

19 Li D. Overlapped multiplexing principle and an improved capacity on Additive White Gaussian Noise Channel // IEEE Access. – 2017. – vol. 6. – pp. – 6840–6848.

20 Martone M. A multicarrier system based on the fractional Fourier transform for time-frequency selective channels // IEEE Transactions on Communications. – 2001. – vol. 49. – no. 6. – pp. 1011–1020.

21 Erseghe T., Laurenti N., Cellini V. A multicarrier architecture based upon the affine Fourier transform // IEEE Transactions on Communications. – 2005. – vol. 53. – no. 5. – pp. 853–862.

22 Galli S., Koga H., Kodama N. Advanced signal processing for PLCs: Wavelet – OFDM // In Proc. 2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. – IEEE, 2008. – pp. 187–192.

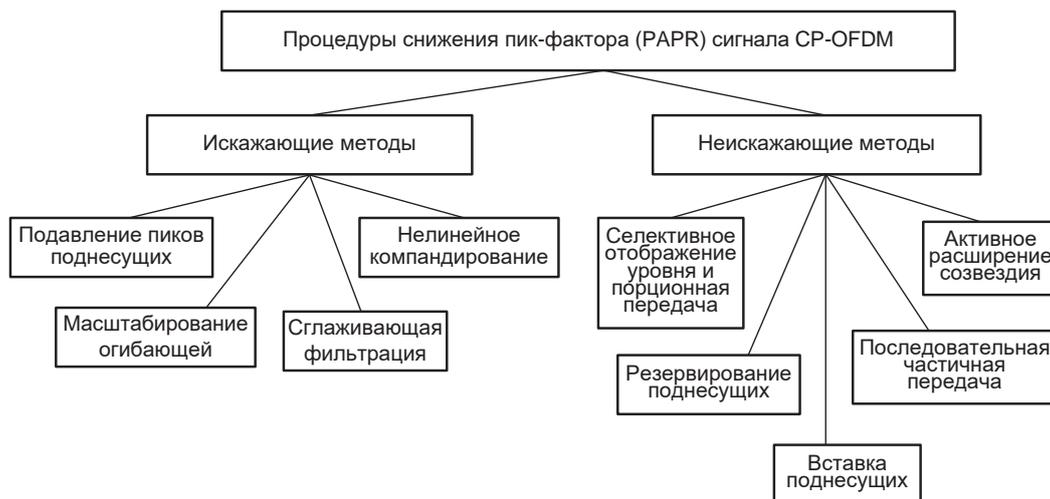


Рис. 2. Способы снижения пик-фактора (PAPR) сигнала CP-OFDM

на основе дискретных вейвлет-преобразований; LVDM [5] – мультиплексирование с частотным разделением по Лагранжу и Вандермонду, и также – SNMC²³ – множественная неортогональная несущая на основе функций Слепиана (вытянутых волновых сфероидальных функций PSWF).

Схемы реализации указанных способов обработки сигналов с множественной несущей достаточно сложны, причем эффективность их применения нуждается в дальнейших исследованиях.

Проблема большого пик-фактора (PAPR) сигнала CP-OFDM связана с высокой вероятностью совпадения текущих фаз множественных сигналов поднесущих за время достаточно протяженного символического интервала. Указанная особенность сигнальной конструкции многочастотного сигнала является системной, поэтому радикально устранить её как причину возникновения высокого PAPR невозможно. На (рис. 2) показано, что известные методы снижения PAPR разделяются на искажающие и неискажающие. Искажающие методы снижения пик-фактора изменяют форму сигнала, например, посредством ограничения уровня его амплитуды или посредством сглаживающей фильтрации. Поскольку указанные методы достаточно просты, они широко известны и часто используются на практике.

Однако искажающие методы вносят в сигнал CP-OFDM существенные нелинейные искажения, как внутрисполосные – ICI, так и внеполосные – OOBЕ. Поэтому значительное внимание разработчики уделяют исследованию неискажающих методов. Среди них известны такие, как селективное отображение уровня и порционная передача (SLM) [6], последо-

вательная частичная передача (PTS)²⁴, резервирование поднесущих (TR)²⁵, вставка поднесущих (TI)²⁶ и активное расширение созвездия (ACE)²⁷.

В рамках исследования возможностей неискажающих методов, в ходе поиска эффективных алгоритмов управления фазами сигналов множественных поднесущих в целях снижения вероятности их совпадения²⁸, определенное внимание уделялось исключению совпадения абсолютных значений фаз сигналов, устанавливаемых в моменты их модуляции. На практике, требуемые смещения модуляционных фаз обеспечиваются случайным выбором начальных фаз опорных колебаний, используемых при формировании и при демодуляции множественного сигнала. Отметим, что штатным вариантом является также использование поворота абсолютных значений фаз модуляции сигнала QAM на некоторый угол относительно точек типового созвездия. При этом, по данным ГОСТ-Р 58912²⁹ при повороте созвездия на угол порядка $\pi/4$, за счет разноса координат точек созвездия и повышения тем самым их различимости при демодуляции CP-OFDM, также может быть достигнут энергетический выигрыш по помехоустойчивости

23 Yang X., Wang X., Zhang J. A new waveform based on Slepian basis for 5G system // In Proc. 2016 IEEE Wireless Days Conference (WD). – IEEE, 2016. – pp. 1–4.

24 Nghia T. V. Optimization Scheme of Partial Transmit Sequences Technique for Peak-to-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals and its FPGA Implementation // Digital Signal Processing. – 2017. – no. 4. – pp. 57–62.

25 Wattanasuwakul T., Benjapolakul W. PAPR Reduction for OFDM Transmission by using a method of Tone Reservation and Tone Injection // IEEE ICICS. – 2015. – pp. 273–277.

26 Tuna C., Jones D. L. Tone Injection With Aggressive Clipping Projection for OFDM PAPR // IEEE ICASSP. – 2010. – pp. 3278–3281.

27 Dhuness K., Maharaj B.T. Analysis Of An Offset Modulation Transmission // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2013. 19 (2013).

28 Tellambura C. Improved Phase Factor Computation for the PAPR Reduction of an OFDM Signal Using PTS // IEEE Commun. Lett. – Apr. 2001. – vol. 5. – no. 4. – pp. 135–137.

29 ГОСТ-Р 58912 – 2020. Телевидение вещательное цифровое. Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-T2. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2020. – 76 с.

до 7,6 дБ. Поэтому, согласно стандарту 3GPP³⁰ этот способ улучшения модуляции использован в рассмотренных выше технологиях FBMC-OQAM и WCC-FBMC-OQAM. Однако, указанные меры не оказывают существенного влияния на вероятность совпадения текущих фаз множественных сигналов поднесущих за время символического интервала между моментами модуляции, т.е. на величину показателя PAPR.

Более эффективное влияние на снижение показателя PAPR оказывает разнос моментов модуляции сигналов поднесущих во времени. Примером применения такой технологии является векторная OFDM (V-OFDM)³¹, согласно которой данные модуляции N поднесущих символа OFDM делятся на K групп и используются для модуляционной установки фаз сигналов K векторов длиной N/K . «Частотные» представления модулированных векторов преобразуются посредством N/K -мерного ОБПФ во временные отсчеты и перемежаются, образуя результирующий выходной символ, вновь длиной N . При этом, моменты модуляции фаз отдельных OFDM поднесущих оказываются псевдослучайным образом разнесены во времени, что несколько снижает вероятность последующего совпадения текущих фаз. К недостаткам представленного способа снижения PAPR относится то, что спектр перемеженного сигнала не локализован, вследствие чего возрастают межканальные помехи ICI поднесущих и существенно усложняются реализации частотного эквалайзера и демодулятора.

Таким образом, многие неискажающие методы базируются на технологии расширенного скремблирования поднесущих множественного сигнала и требуют значительного усложнения алгоритмов обработки, кроме того снижается пропускная способность системы, поскольку определенная часть информационной ёмкости канала задействуется для передачи служебной информации, предназначенной для управления процедурами снижения пиковой мощности.

Например, SLM предполагает формирование нескольких эквивалентных представлений символов, для TR требуется часть поднесущих оставить немодулированными, а TI предполагает добавление поднесущих с управляемой мощностью.

Специфическая проблема возникает при использовании сигнала со множественной несущей в широкополосных каналах миллиметрового или терагерцового диапазона. Известно, что при увеличении частоты несущей растёт показатель спектральной плотности фазовых флуктуаций сигнала (PHN),

вследствие чего разница его значений на границах широкой полосы рабочих частот может быть весьма значительной. Так, по данным [7], разница PHN между OFDM поднесущими на частотах 1 и 28 ГГц составляет значение около 20 дБ. Кроме того, по мере повышения несущей частоты уменьшается интервал когерентности канала с рассеянием, что ограничивает совокупное время, отведенное для измерения канала и осуществления передачи. В результате, применение в широкополосных каналах сигнала множественной несущей с длинным символом и с плотным расположением поднесущих приводит к недопустимому росту числа ошибок и к значительному ухудшению производительности системы. Таким образом, в высокоскоростных URLLC-системах с ультранизкой задержкой передачи данных возможно использование только многочастотных СК с увеличенным частотным разнесом поднесущих и укороченным символическим интервалом. Однако, для передачи низкоскоростного трафика данных системы интернета вещей (IoT) все же целесообразно использовать узкополосные (в смысле общей полосы и плотности поднесущих) OFDM конструкции. Для решения описанных выше проблем, консорциум 3GPP стандартизировал переменный коэффициент разнесения OFDM поднесущих, вводя так называемую масштабируемую нумерологию (SN). Стандартизация SN гарантирует согласование структуры сигнала множественной несущей соответственно задачам его применения. Так, для перспективных диапазонов 5G/6G NR миллиметровых волн спектральный разнос между ортогональными поднесущими варьируется, начиная со значения 15 кГц для LTE и заканчивая интервалом 30, 60 или 120 кГц³².

По результатам выполненного анализа установлено, что во многих случаях вследствие мероприятий по снижению OOBЕ и PAPR многочастотного сигнала, либо нарушается ортогональность сигналов поднесущих, что приводит к возрастанию уровня их взаимных помех (ICI), либо снижается эффективность циклического префикса, что приводит к возрастанию уровня межсимвольных помех (ISI). Очевидно, что в этих условиях объективным критерием оптимальности выбора параметров сигнала многочастотной системы является коэффициент битовых ошибок (BER), снижающийся с уменьшением PAPR и OOBЕ, но увеличивающийся из-за роста ICI и ISI.

В процессе поиска компромиссных решений, разработчиками была предложена эффективная процедура снижения параметра OOBЕ OFDM сигнала без увеличения показателя PAPR и ухудшения

30 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.211 V13.3.0. In Technical Specification Group Radio Access Network. Physical Channels and Modulation (Release 13). – New Orleans, LA, USA, 2016.

31 Xia X.-G. Precoded and vector OFDM robust to channel spectral noise and with reduced cyclic prefix length in single transmit antenna systems // IEEE Transactions on Communications. – 2001. – vol. 49. – no. 8. – pp. 1363–1374.

32 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 38.211 V16.3.0. 5G, NR. Physical channels and modulation (Release 16). ETSI TS 138 211 V16.3.0 (2020-11).

характеристик BER, получившая название технологии спектрального прекодирования данных модуляции SP-OFDM³³.

Согласно указанной технологии существенное снижение взаимных помех сигналов различных пользователей системы обеспечивается подавлением сигналов соответствующих поднесущих в частотной области (FDSS) при использовании в области данных дополняющего нулями кодирования (DDCS).

Результаты исследования сигналов с одной несущей

В ходе исследований технологии SP-OFDM рассматривались различные процедуры обеспечения спектрального прекодирования данных модуляции OFDM. В результате чего было установлено, что наиболее эффективным средством обеспечения гибкого управления свойствами формируемого сигнала согласно требуемым сценариям связи и низкого показателя PAPR, является процедура прямого дискретного преобразования Фурье (ДФТ)³⁴.

Рассмотрим структуру сигнала DFT-s-OFDM подробнее:

$$\hat{d}(n \cdot T_o / N) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=0}^{N-1} \left[c_k \left(\sum_{m=0}^{M-1} d_m \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{M} m} \right) \right] e^{j2\pi \frac{k}{N} n},$$

$$n \in [1, N], \tag{2}$$

где: $\{D_m\}_{m=0}^{M-1}$ – комплексные символы данных PSK/QAM модуляции; $e^{-j2\pi \frac{k}{M} m}$ – k -й частотный фактор прямого дискретного преобразования Фурье (ДФТ) размерности M ; $\{c_k\}_{k=0}^{N-1}$ – оператор формирования спектра (FDSS); $e^{j2\pi \frac{k}{N} n}$ – k -й частотный фактор обратного дискретного преобразования Фурье (ОДФТ) размерности $N \geq M$; $T_o = 1/(f_{k+1} - f_k)$ – интервал ортогональности N спектральных представлений формируемого сигнала; $n \cdot T_o / N = t_n$ – моменты котельниковских отсчетов.

На каждом такте формируемого сигнала N информационных отсчетов интервала ортогональности T_o , полученные согласно (2) посредством OFDM,

дополняются L отсчетами циклического префикса $T_{su} = L \cdot T_o / N$: $\hat{d}(t_n) = \hat{d}(t_n - T_o)$ или $\hat{d}(t_n) = -\hat{d}(t_n - T_o)$, для $t_n = n \cdot T_o / N$ и $n \in [N+1, N+L]$, образуя в совокупности набор $N+L$ отсчетов полного символического интервала: $T_c = T_o + T_{su}$ соответственно.

Как следует из рассмотрения выражения (2), на первой стадии формирования сигнала DFT-s-OFDM, посредством ДПФ $m \in [0, M-1]$, на k -х OFDM-частотах вычисляется широкополосный спектр импульсного сигнала высокоскоростной несущей. Тем самым, обработка исходного временного сигнала d_m переносится в частотную область, где далее, посредством оператора FDSS c_k , формируется спектр сигнала с заданными характеристиками. На заключительной стадии формирования, согласно (2), посредством ОДФТ вычисляются отсчеты сигнала широкополосной несущей с требуемыми параметрами.

Известно, что сигнал одиночной широкополосной несущей по определению обладает низким значением PAPR и, следовательно, способен обеспечить эффективную работу недорогих передающих устройств с существенной нелинейностью усилительного тракта и ограниченным энергоресурсом.

Также, в отличие от сигналов со множественной несущей, сигнал одной широкополосной несущей устойчив к частотно-зависимым изменениям спектральной плотности фазовых флуктуаций (PHN) и доплеровским смещениям канальной частоты. Указанные преимущества обусловили не только широкое применение такого сигнала в системах сотовой связи предыдущих и современных поколений 4G LTE (UL), но и определяют целесообразность его применения в перспективных системах 5G/6G NR.

На (рис. 3) представлены некоторые способы формирования сигналов с одной несущей.

Согласно процедуре SC-QAM/SC-FDE³⁵ генерация сигнала одной несущей с квадратурно-амплитудной модуляцией, занимающего всю полосу пропускания канала, выполняется на передаче путем прямого цифрового синтеза его временных отсчетов.

33 Huang X., Zhang J. A., Guo Y. J. Out-of-Band Emission Reduction and a Unified Framework for Precoded OFDM // IEEE Communications Magazine. – 2015. – vol. 53. – no. 6. – pp. 151–159.
 34 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 38.211 V15.7.0. In Technical Specification Group Radio Access Network. Physical Channels and Modulation (Release 15). – Newport Beach, CA, USA, 2019.

35 Pancaldi F., Vitetta G. M., Kalbasi R., Al-Dahir N., Uysal M., Mheidat H. Single Carrier Frequency Domain Equalization // IEEE Signal Processing Magazine. – 2008. – vol. 25. – no. 5. – pp. 37–56.



Рис. 3. Способы формирования сигналов с одной несущей

При этом, для обеспечения работы на приемной стороне частотного эквалайзера (FDE), в сигнал также периодически добавляются фиксированные последовательности отсчетов испытательного сигнала (UW) и нулей (ZT). В течение времени тестирования по результатам оценки CHIRP-сигнала UW эквалайзер получает данные о частотной характеристике канала и затем выравнивает ее (ZF, MMSE).

Технология OVTDM³⁶ использует для формирования одночастотного сигнала временное мультиплексирование с перекрытием импульсных реакций канала, обеспечивая тем самым работу системы на скорости выше предела Найквиста. Однако сложность приемника и необходимость проведения дополнительных детальных исследований по оценке степени увеличения пропускной способности на этой основе, в настоящее время ограничивают применение указанной технологии.

Согласно технологии ZT/UW-DFT-s-OFDM³⁷, в случае применения для формирования сигнала одной несущей прекодирования OFDM по типу ДПФ (DFT), также возможно использование для выравнивания и оценки характеристик канала вместо префиксного защитного интервала (ЗИ), специального ЛЧМ испытательного сигнала (UW) и нулей (ZT) пассивного ЗИ.

Однако, как и в случае SC-QAM/SC-FDE, замена отсчетов циклического префикса уникальной комбинацией ZT/UW приводит к снижению способности сигнала противодействовать воздействию межсимвольной интерференции (ISI) и к потере унификации его структуры.

Отметим, что представленная выражением (2) типовая технология синтеза сигнала DFT-s-OFDM с активным ЗИ в виде циклического префикса (CP), не только обеспечивает противодействие СК ISI, но и является достаточной для формирования требуемых свойств сигнала посредством процедуры FDSS в рамках его унифицированной структуры, т.е. при фиксированных прочих параметрах. Напомним, что согласно определенным выше требованиям, СК перспективного для 6G сигнала должна обеспечивать: одновременно сканирование канала и передачу данных (ISAC/DFRC), совместимость с MIMO, низкие показатели OOBЕ и PAPR.

Процедура спектрального прекодирования сигнала DFT-s-OFDM с CP обеспечивает:

- ❖ низкий показатель OOBЕ, посредством введения в его спектр интервалов защитного частотного разделения³⁸;

- ❖ совместимость с MIMO, за счет использования для множественной передачи данных каналов, сформированных на принципах SC-FDMA³⁹.

В случае ухудшения показателя PAPR сигнала DFT-s-OFDM при использовании многопозиционной QAM и пилот-сигналов, обеспечивающих когерентность её демодуляции, применение спектрального прекодирования OFDM типа полиномиальной отмены (PCC) [8] или интерполяции совокупности символов⁴⁰ позволяет компенсировать указанный негативный эффект.

Для обеспечения функционирования системы ISAC/DFRC, посредством спектрального прекодирования одночастотный сигнал DFT-s-OFDM может быть преобразован в форму линейной комбинации CHIRP-сигналов [9], используемых как для оценки характеристик канала, так и для передачи данных.

Отметим, что согласно данным источников, во всех рассмотренных случаях, в рамках унифицированной структуры сигнала DFT-s-OFDM, его свойства, отвечающие требованиям случая конкретного применения, согласно (2) определяются оператором формирования спектра (FDSS) $\{c_k\}_{k=0}^{N-1}$.

Так согласно [8], для спектра исходного сигнала d_r : $D_r = \sum_{r=0}^{M-1} d_r \times e^{-j2\pi \frac{k}{M} r}$, где $q \in \{0, 1, 2, \dots\}$ – порядок полинома PCC, k -е компоненты оператора FDSS c_k^q , осуществляющего кодирование полиномиальной отмены, определяются как: $c_k^q = \sum_{u=0}^{2^q-1} (-1)^u d_r \times e^{-j2\pi \frac{k}{M} u}$.

А согласно [9], для формирования CHIRP-сигнала с линейной формой изменения во времени мгновенной частоты и параметром девиации $D = M$, в (2) используются указанные компоненты c_k вида: $c_k = \sqrt{\frac{\pi}{D}} \cdot (C(x_1) + C(x_2) + j S(x_1) + j S(x_2)) \times e^{-j2\pi \frac{k}{2D} - j\pi k}$, где $C(\cdot)$ и $S(\cdot)$ – интегралы Френеля с косинусной и синусной функциями соответственно, а $x_1 = (D/2 + 2\pi k) / \sqrt{\pi D}$ и $x_2 = (D/2 - 2\pi k) / \sqrt{\pi D}$.

Таким образом, процедура спектрального прекодирования данных модуляции является отличительной особенностью СК DFT-s-OFDM и определяет способность данной технологии обеспечить выполнение требований применения указанного сигнала в сетях 6G, сообразно различным сценариям связи. Спектральное прекодирование осуществляется средствами программируемого радио (SDR) путем гибкого управления оператором FDSS в рамках унифицированной структуры СК, что обеспечивает возможность использования всех модификаций сигнала в типовых DFT-s-OFDM-приемопередатчиках.

36 Anderson J. B., Rusek F., Öwall V. Faster-than-Nyquist signaling // Proceedings of the IEEE. – 2013. – vol. 101. – no. 8. – pp. 1817–1830.

37 Berardinelli G., Tavares F. M., Sorensen T. B., Mogensen P., Pajukoski K. Zero-Tail DFT-spread-OFDM signals // In Proc. 2013 IEEE GlobeCom Workshops. – IEEE, 2013. – pp. 229–234.

38 Huang X., Zhang J. A., Guo Y. J. Out-of-Band Emission Reduction and a Unified Framework for Precoded OFDM // IEEE Communications Magazine. – 2015. – vol. 53. – no. 6. – pp. 151–159.

39 Myung H., Lim J., Goodman D. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission // IEEE Veh. Technol. Mag. – 2006. – no.1. – pp. 30–38.

40 MediaTek Inc. A new DFT-s-OFDM compatible low PAPR technique for NR uplink waveforms. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) RAN1 (R1) 1609378, Oct. 2016. https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_186b/Docs/.

Экспериментальное подтверждение полученных результатов

В работах [8] и [9] представлены результаты численного моделирования анализируемых типов перспективных радиосигналов. Представленные характеристики демонстрируют технологические возможности управления параметрами сигналов DFT-s-OFDM применительно к различным сценариям организации связи при сохранении заданной помехоустойчивости передачи данных, например на уровне $BER \leq 1 \cdot 10^{-4}$ при $E_b/N_0 \approx 8$ дБ AWGN. Для оценки системы ISAC/DFRC моделировались сигналы рабочей полосы порядка 2 ГГц. Для оценки показателя ООБЕ моделировались соседние сигналы пользователей средней полосы (порядка 10 МГц) и пользователей узкой полосы (порядка 3 МГц).

В частности, в [8] показано, что при локализованном отображении в частотную область применение РСС с полиномом первого порядка, даже к сигналам с фазовой модуляцией низкой кратности ($\pi/2$ -BPSK и QPSK), снижает показатель PAPR на 2-3 дБ и улучшает показатель ООБЕ на 10 дБ без ухудшения показателя BER (см. рис. 4).

В [9] показано, что сигнал CHIRP-DFT-s-OFDM, обладающий по определению $PAPR = 0$ дБ, в случае использования частотного разнесения, обеспеченного повторением передаваемых символов посредством линейных циркулярно-сдвинутых чирпов, обеспечивает эффективное зондирование канала при улучшении показателя ООБЕ в указанных выше пределах, при $R = 4$ также практически без ухудшения показателя BER (увеличение E_b/N_0 на 1,0 дБ) (см. рис. 5).

При этом в [8] отмечается лишь незначительное увеличение вычислительной сложности алгоритма цифровой обработки. Отметим, что в обоих моделируемых случаях реконфигурация свойств СК осуществляется посредством целенаправленного введения в сигнал избыточности, т.е. за счет контролируемого снижения пропускной способности основного канала передачи данных. В итоге, поскольку во всех моделируемых случаях программное управление показателями качества и функциональным назначением сигнала связи осуществляется посредством оператора FDSS унифицированного алгоритма (2), результаты представленных экспериментов доказывают технологичность применения в 6G сигнальных конструкций DFT-s-OFDM.

Заключение

Изучены функциональные особенности новых приложений (eMBB, URLLC, mMTC) сетей 6G, в результате чего установлено, что сигнальная конструкция (СК) перспективного для указанных сетей сигнала, должна обеспечивать низкие показатели ООБЕ

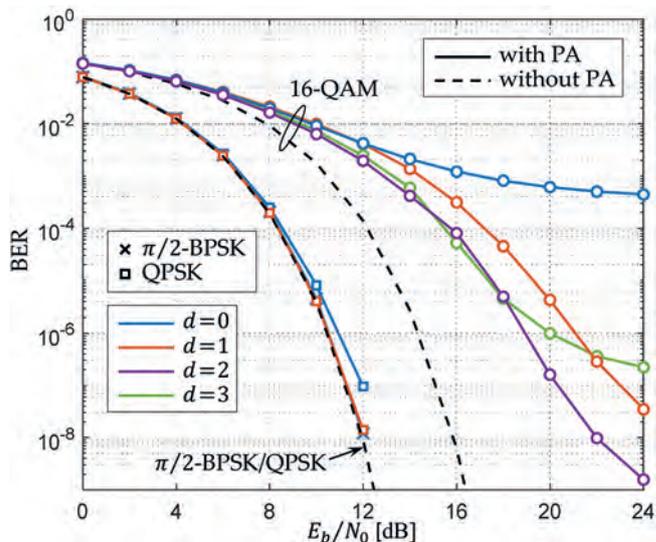
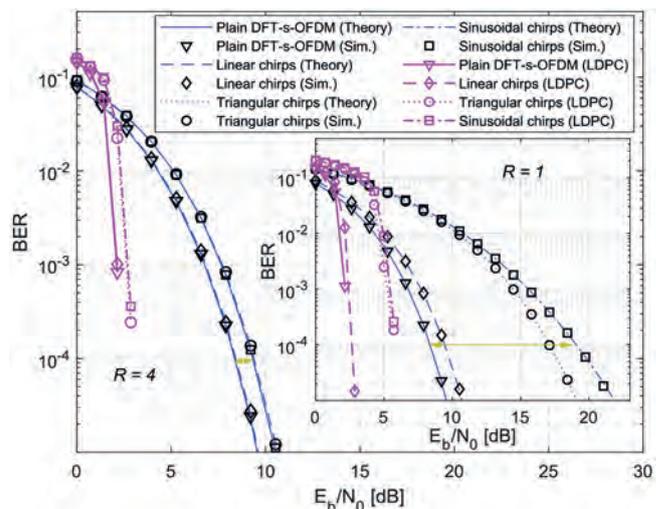


Рис. 4. Помехоустойчивость (BER) сигналов РСС-DFT-s-OFDM с PSK и 16 QAM при порядке полинома кодирования $d = 0, 1, 2, 3$ в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN) с учетом влияния нелинейности усилителя мощности (PA) и без него [8]



- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Plain DFT-s-OFDM (Theory) | Обычный DFT-s-OFDM (теория) |
| Plain DFT-s-OFDM (Sim.) | Обычный DFT-s-OFDM (моделирование) |
| Linear chirps (Theory) | Линейные CHIRP (теория) |
| Linear chirps (Sim.) | Линейные CHIRP (моделирование) |
| Triangular chirps (Theory) | Треугольные CHIRP (теория) |
| Triangular chirps (Sim.) | Треугольные CHIRP (моделирование) |
| Sinusoidal chirps (Theory) | Синусоидальные CHIRP (теория) |
| Sinusoidal chirps (Sim.) | Синусоидальные CHIRP (моделирование) |
| Plain DFT-s-OFDM (LDPC) | Обычный DFT-s-OFDM (LDPC) |
| Linear chirps (LDPC) | Линейные CHIRP (LDPC) |
| Triangular chirps (LDPC) | Треугольные CHIRP (LDPC) |
| Sinusoidal chirps (LDPC) | Синусоидальные CHIRP (LDPC) |

Рис. 5. Помехоустойчивость (BER) некодированных и LDPC-кодированных обычного DFT-s-OFDM сигнала и сигналов CHIRP-DFT-s-OFDM с вариантами числа повторений $R = \{1, 4\}$, в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (AWGN) [9]

и PAPR, технологическую совместимость с MIMO и одновременное с передачей данных сканирование канала по типу ISAC/DFRC.

Определена технологичность СК, как её способность наиболее полно обеспечить установленные показатели качества и требуемые сценарии связи, при максимальной унификации структуры сигнала и алгоритмов его обработки. Предложена методология исследования технологических возможностей СК с точки зрения эффективности их применения в 6G.

Выполнен системный анализ технологических возможностей различных вариантов СК с множественной несущей типа OFDM и с одной несущей (SC), включая СК типа DFT-s-OFDM. Получены соответствующие оценки, рассмотренные СК классифицированы.

Показано, что сигнал множественной несущей технологии CP-OFDM имеет высокие показатели OOBЕ и PAPR, а способы улучшения этих параметров не технологичны, поскольку реализуются посредством сложных и специфических технических решений. Указанные обстоятельства ограничивают применение сигнала CP-OFDM в сетях 6G.

Также показано, что сигнал одиночной широкополосной несущей технологии DFT-s-OFDM по определению обладает низким показателем PAPR и посредством процедуры спектрального прекодирования обеспечивает гибкость программного управления параметрами сигнальной конструкции соответственно различным сценариям связи в системах 6G, использующих типовые приемопередатчики DFT-s-OFDM.

Результаты получены в ходе исследования технологических решений систем, сетей и устройств радиотелекоммуникаций и могут быть использованы при разработке рекомендаций для создания перспективной отечественной системы связи 5G/6G, обеспечивающей сверхвысокие скорости передачи данных и ультрамалые задержки [10]. Актуальность создания указанной системы подтверждается сведениями о наличии зарубежных разработок по применению подобных систем, в том числе и в военных целях [11]. В России, обладающей значительными территориями, в некоторых случаях подобные сети позиционируются как элементы протяженных сетевых систем [12], построенных с использованием сквозных цифровых технологий [13], в частности для применения в Арктическом регионе РФ с использованием КВ-радиосвязи [14] или тропосферных станций [15]. В этом плане значительное внимание уделяется вопросам организации каналов связи [16] и управления [17] мобильного транспортного домена сетей 5G/6G. При этом подразумевается построение трехмерной (частотно-временной и пространственной) архитектуры сетей 6G [18]. Таким образом, результат определения структуры СК, оптимальной по критерию максимальной спектрально-энергетической эффективности и соответствия требуемым параметрам эксплуатации сетей 5G/6G весьма важен для отечественных разработчиков, поскольку позволяет оптимизировать структуру сигнала информационной системы в целом, включая обеспечение требований информационной безопасности [19].

Литература

1. Тонг В., Чжу П. *Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту*; под ред. В. Тонг, П. Чжу / *Вэнь Тонг, Пейин Чжу*; пер. с англ. В. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 624 с.
2. Лучин Д.В. *Тенденции и перспективы развития радиосистем субтерагерцового диапазона. В сборнике: Актуальные проблемы радиозлектроники и телекоммуникаций*; под редакцией А.И. Данилина / Д.В. Лучин. – Самара: Материалы Всероссийской научно-технической конференции АПРИТ, 2022. – С. 8–11.
3. Tripathi S., Sabu N. V., Gupta A. K., Dhillon H. S. *Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless* // *Computer Communications and Networks*. – 20 Feb. 2021.
4. Liu X., Xu T., Darwazeh I. *Coexistence of orthogonal and nonorthogonal multicarrier signals in beyond 5G scenarios* // *In Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. – IEEE, 2020. – pp. 1–5.
5. Tourki K., Zakaria R., Debbah M. *Lagrange Vandermonde Division Multiplexing* // *In Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. – IEEE, 2020. – pp. 1–6.
6. Munir M., Youssef M. I., Abosha A. M. *Low-Complexity Selective Mapping Technique for PAPR Reduction in Downlink Power Domain OFDM-NOMA* // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2023, 10.
7. Buritica A. *From Waveforms to MIMO: 5 Things for 5G New Radio* // *Microwave Journal*. – 14 May 2019.
8. Cho L., Kuo Y. M., Wu Y. S., Hsu C. Y. *Polynomial Cancellation Coded DFT-s-OFDM for Low-PAPR uplink signaling* // *Electronics (Switzerland)*. – November 2019. – 8(11):1349.
9. Sahin A., Hosseini N., Hosseinali J., Shams S., Hoque M., Matolak D. W. *DFT-spread-OFDM Based Chirp Transmission* // *IEEE Communications Letters*. – March 2021. – vol.25. – Issue 3.
10. Антонова В. М., Клыгин Д. С., Кондрашова Д. А., Бабаханов С. А. *Влияние 5G на нашу жизнь* // *Colloquium-Journal*. – 2021. – № 34-1 (121). – С. 9–12.
11. Milicevic Z. M., Bojkovic Z. S. *Review of 5G and 6G applications for mobile wireless communication in the military environment* // *Military Technical Courier*. – 2024. – V. 72. – № 1. – pp. 435–451.
12. Gulyaev Y. V., Oleinikov A. Ya., Makarenko S. I. *Russian approach to interoperability formalization of network-centric systems* // *In Proceedings of 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. – IEEE, 2021. – pp. 72–75.

13. Рыжков А. В., Шварц М. Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования - основы сквозных цифровых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15. – № 7. – С. 14–22.
14. Лучин Д. В., Гавлиевский С. Л., Маслов Е. Н. Масштабируемая телематическая система для арктических регионов РФ с использованием KV-радиосвязи // Электросвязь. – 2019. – № 9. – С. 22–31.
15. Лучин Д. В., Климов Д. А. Тропосферные станции НИИР обеспечат интернетом жителей крайнего севера // Электросвязь. – 2021. – № 9. – С. 13–15.
16. Айметдинова У. А., Веденькин Д. А., Али Аль-Муфти, Мисбахов Р. Ш., Морозов О. Г., Морозов Г. А., Кузнецов А. А. Анализ метода двухчастотной инициализации каналов связи транспортного домена сетей 5G/6G // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 9. – С. 140–143.
17. Айметдинова У. А., Булдакова К. Э., Али Аль-Муфти, Василец С. А., Василец А. А., Мисбахов Р. Ш., Морозов Г. А. Формирование узкополосного сигнала управления для мобильного транспортного домена сетей 5G/6G // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 11. – С. 324–326.
18. Девяткин Е. Е., Иванкович М. В., Пастух А. С. Анализ возможности построения трехмерной архитектуры сетей 6G // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – Т. 12. – № 6. – С. 91–99.
19. Макаренко С. И. Тестирование на проникновение на основе стандарта NIST SP 800-115 // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 3 (49). – С. 44–57.

References

1. Tong V., Chzhu P. Put' ot 5G k 6G glazami razrabotchikov. Ot podkljuchennyh ljudej i veshhej k podkljuchennomu intellektu; pod red. V. Tong, P. Chzhu / Vjen' Tong, Pejın Chzhu; per. s angl. V.S. Jacenkova. – M. : DMK Press, 2022. – 624 с.
2. Luchin D. V. Tendencii i perspektivy razvıtija radiosistem subteragercovogo diapazona. V sbornike: Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikacij; pod redakciej A. I. Danilina / D. V. Luchin. – Samara : Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii APRIT, 2022. – S. 8–11.
3. Tripathi S., Sabu N. V., Gupta A. K., Dhillon H. S. Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless // Computer Communications and Networks. – 20 Feb. 2021.
4. Liu X., Xu T., Darwazeh I. Coexistence of orthogonal and nonorthogonal multicarrier signals in beyond 5G scenarios // In Proc. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). – IEEE, 2020. – pp. 1–5.
5. Tourki K., Zakaria R., Debbah M. Lagrange Vandermonde Division Multiplexing // In Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2020. – pp. 1–6.
6. Munir M., Youssef M. I., Abosha A. M. Low-Complexity Selective Mapping Technique for PAPR Reduction in Downlink Power Domain OFDM-NOMA // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2023, 10.
7. Buritica A. From Waveforms to MIMO: 5 Things for 5G New Radio // Microwave Journal. – 14 May 2019.
8. Cho L., Kuo Y. M., Wu Y. S., Hsu C. Y. Polynomial Cancellation Coded DFT-s-OFDM for Low-PAPR uplink signaling // Electronics (Switzerland). – November 2019. – 8(11):1349.
9. Sahin A., Hosseini N., Hosseinali J., Shams S., Hoque M., Matolak D. W. DFT-spread-OFDM Based Chirp Transmission // IEEE Communications Letters. – March 2021. – vol.25. – Issue 3.
10. Antonova V. M., Klygin D. S., Kondrashova D. A., Babahanov S. A. Vlijanie 5G na nashu zhizn' // Colloquium-Journal. – 2021. – № 34-1 (121). – S. 9–12.
11. Milicevic Z. M., Bojkovic Z. S. Review of 5G and 6G applications for mobile wireless communication in the military environment // Military Technical Courier. – 2024. – V. 72. – № 1. – pp. 435–451.
12. Gulyaev Y. V., Oleinikov A. Ya., Makarenko S. I. Russian approach to interoperability formalization of network-centric systems // In Proceedings of 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – IEEE, 2021. – pp. 72–75.
13. Ryzhkov A. V., Shvarc M. L. Predposylki sozdaniya kogerentnoj seti svjazi obshhego pol'zovaniya - osnovy skvoznyh cifrovnyh tehnologij // T-Comm: Telekommunikacii i transport. – 2021. – Т. 15. – № 7. – С. 14–22.
14. Luchin D. V., Gavlievskij S. L., Maslov E. N. Masshtabiruemaja telematicheskaja sistema dlja arkticheskikh regionov RF s ispol'zovaniem KV-radiosvjazi // Jelektrosvjaz'. – 2019. – № 9. – С. 22–31.
15. Luchin D. V., Klimov D. A. Troposfernye stancii NIIR obespechat internetom zhitelej krajnego severa // Jelektrosvjaz'. – 2021. – № 9. – С. 13–15.
16. Ajmetdinova U. A., Veden'kin D. A., Ali Al'-Mufti, Misbahov R. Sh., Morozov O. G., Morozov G. A., Kuznecov A. A. Analiz metoda dvuhchastotnoj inicializacii kanalov svjazi transportnogo domena setej 5G/6G // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2023. – № 9. – S. 140–143.
17. Ajmetdinova U. A., Buldakova K. Je., Ali Al'-Mufti, Vasilec S. A., Vasilec A. A., Misbahov R. Sh., Morozov G. A. Formirovanie uzkopolosnogo signala upravlenija dlja mobil'nogo transportnogo domena setej 5G/6G // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. – 2023. – № 11. – S. 324–326.
18. Devjatkin E. E., Ivankovich M. V., Pastuh A. S. Analiz vozmozhnosti postroenija trehmernoj arhitektury setej 6G // Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov. – 2021. – Т. 12. – № 6. – С. 91–99.
19. Makarenko S. I. Testirovanie na proniknovenie na osnove standarta NIST SP 800-115 // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2022. – № 3 (49). – S. 44–57.

