

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.10>

УДК: 621.376.9

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ЧАСТОТНОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИКАЛЬНЫХ СЛОВ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ 5G И 6G

Р.О. Сальников, И.К. Мешков, А.Р. Гизатулин, А.Х. Султанов,
А.Л. Тимофеев, А.Г. Мешкова

Уфимский университет науки и технологий,
450008, Карла Маркса 12, корпус 6

Статья поступила в редакцию 7 мая 2025 г.

Аннотация. В работе исследуется применение технологии уникальных слов (Unique Word, UW) для оценки и компенсации частотного рассогласования в спутниковых системах связи пятого и шестого поколений. Проведено сравнение различных последовательностей для генерации UW (Фрэнка, Уолша-Адамара, Задова-Чу и фазового псевдошума) в каналах с белым гауссовским шумом и многолучевым распространением. Результаты моделирования показывают, что последовательности Уолша-Адамара и фазового псевдошума обеспечивают снижение среднеквадратической ошибки на 15-20% при оптимальном разнесении 360 кГц, демонстрируя высокую эффективность при значительном доплеровском сдвиге.

Ключевые слова: OFDM, DFT-s-OFDM, 5G NR, 6G, уникальные слова, частотное рассогласование, низкоорбитальные спутники, конвергентные телекоммуникационные системы.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Автор для переписки: Сальников Роман Олегович, kosshak17@yandex.ru

Введение

Нарастание объема передаваемого трафика в мобильных сетях увеличивается с каждым годом в связи с появлением различных приложений, критически зависящих от высокой пропускной способности каналов передачи данных. По мере стандартизации узкополосного интернета вещей (NB-IoT), промышленного интернета вещей и полностью подключенных транспортных средств (V2X), мобильные сети сместили акцент с подключения людей к подключению вещей с помощью сверхнадежных систем связи с малой задержкой (URLLC) и потоковой межмашинной связи (mMTC) [1], при этом организация глобального покрытия может быть решена только при использовании спутниковых сетей связи в сетях 5 и 6 поколения.

Одной из ключевых проблем при организации спутниковых каналов при ретрансляции данных с наземных мобильных сетей связи является частотное рассогласование, возникающее вследствие эффекта Доплера. Для низкоорбитальных спутниковых систем в диапазоне Ka (30 ГГц) доплеровский сдвиг может достигать ± 720 кГц при скорости изменения до 8,16 кГц/с, что создает существенные проблемы при передаче данных [2].

Технология Unique Word (UW) представляет собой перспективный метод борьбы с частотным рассогласованием, основанный на добавлении известной уникальной последовательности символов к передаваемому сигналу, а также возможности снижении пик-фактора передаваемого сигнала с целью экономии энергии мобильных терминалов. В отличие от циклического префикса, UW позволяет не только компенсировать межсимвольную интерференцию, но и улучшить синхронизацию и оценку канала.

1. Теоретические основы UW DFT-s-OFDM

UW DFT-s-OFDM представляет собой модификацию классической технологии DFT-s-OFDM, где вместо циклического префикса используется уникальное слово – детерминированная последовательность символов, известная как передатчику, так и приемнику.

Математически сигнал UW DFT-s-OFDM можно описать следующим образом: В DFT-s-OFDM распределение символов данных производится преобразованием Фурье, за которым следует стандартный алгоритм систем OFDM, в котором входные данные распределяются по совокупности в зависимости от выбранной схемы модуляции. Далее происходит преобразование в параллельный код, который впоследствии преобразуется с помощью быстрого преобразования Фурье.

Предположим, что входные данные: $\{d_i, 0 \leq i \leq 2M - 1\}$, в таком случае их отображение выглядит как: $\{x_l = d_{2(i-1)} + jd_{2i-1}, 0 \leq l \leq M - 1\}$. Отображение далее будет обеспечиваться с помощью ДПФ, как показано в (1):

$$S_k = FFT(x_l) = \sum_{l=0}^{M-1} x_l e^{2\pi jlk/M}. \quad (1)$$

ДПФ-распределенные символы, относящиеся к $\{S_k, 0 \leq k \leq M - 1\}$ располагаются по M поднесущих, являющихся меньшей частью $N = QM$ количества поднесущих, благодаря операции заполнения нулями, как показано в (2).

Операция заполнения нулями или zero padding можно описать, как:

$$X_k = \begin{cases} S_k, 0 \leq k \leq M - 1 \\ 0, M \leq k \leq N - 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где k – символ k -й поднесущей [3].

С точки зрения практической реализации данной технологии рассматриваются два различных варианта распределения частот поднесущих для абонентов на основе множественного доступа с разделением частот (FDMA), так называемые распределенный (DFDMA) и локализованный (LFDMA) [4]. DFDMA распределяет выходные данные по M поднесущих, используемых в преобразовании ДПФ по всей полосе частот для N поднесущих, при этом оставшиеся несущие $(N-M)$ заполняются нулями. LFDMA, с другой стороны, представляет выходные данные ДПФ-преобразования на M последовательных

поднесущих в полосе частот на N поднесущих. В то же время, возможно реализовать разновидность распределенного метода доступа – чередующийся метод доступа с частотным распределением (IFDMA), который будет своего рода распределенным FDMA, в котором выходные данные ДПФ-преобразования распределяются с равным расстоянием $N/M = S$, где S – коэффициент расширения полосы пропускания.

Представленная в [5-7], технология UW-DFT-s-OFDM, направлена на создание ненулевых фиксированных конечных и начальных выборок путем добавления уникальных паттернов (unique word) к символам данных DFT-s-OFDM. К исходной последовательности UW-паттерн может быть добавлен как до быстрого преобразования Фурье, так и после, поскольку технологии семейства DFT-s-OFDM основаны на линейных операциях.

Сначала на передающей стороне, последовательность данных $\mathbf{d}$ и заданные последовательности $\mathbf{h}$ и $\mathbf{t}$ сопоставляются с входными данными матрицы дискретного преобразования Фурье $\mathbf{F}_M$. Для генерации фиксированных выборок в хвостовой части каждого блока UW DFT-s-OFDM, выделяются верхний и нижний концы ДПФ распределения, т. е. первый M_h и последний M_t столбцы матрицы $\mathbf{F}_M$, соответственно. Они заполняются заданными последовательностями $\mathbf{h}$ и $\mathbf{t}$, так как занимаемые столбцами площади во временной области соответствуют заголовку и хвосту каждого символа UW-DFT-s-OFDM. Матрица отображения $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ распределяет выходные данные матрицы $\mathbf{F}_M$ по набору M смежных поднесущих в частотной области [5,8]. Распределенные данные в совокупности с фиксированными символами конвертируются из частотной области в временную благодаря $\mathbf{F}_N^H$ таким образом:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{F}_N^H \mathbf{M} \mathbf{F}_M \left[\mathbf{h}^H \mathbf{d}_i^H \mathbf{t}^H \right]^H, \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{N \times N}$ является i -м символом UW-DFT-s-OFDM.

Добавление уникального слова перед блоком ДПФ-распределения имеет ряд преимуществ, таких как повышенная ортогональность, которая поддерживается между UW-паттерном и полезной нагрузкой, поскольку сигналы используют разные входы блока ДПФ. Следовательно, принимающей стороне не требуется каких-либо специальных знаний об уникальном слове для демодуляции символов данных. Смежность между UW-сигналами сохраняется, поскольку над последовательностью уникального слова выполняется круговая свертка с использованием функции sinc. Из-за этого характеристика внеполосных излучений относительно схемы ZT-DFT-s-OFDM не изменяется. Также неизменна и изоляция UW-последовательности от символов данных, что позволяет использовать UW-DFT-s-OFDM в качестве эффективного средства борьбы с основными проблемами передачи в беспроводном канале. Основным недостатком ZT-DFT-s-OFDM является изменчивость хвоста от символа к символу, что приводит к искажениям (межсимвольным помехам) в многолучевых каналах. Усовершенствованная схема UW-DFT-s-OFDM [7] решает проблему межсимвольных помех в многолучевых каналах, возникающую из-за изменчивости хвоста ZT-DFT-s-OFDM от символа к символу, путем введения уникальной части сигнала возмущения, при этом подавляя просачивающуюся из символов данных в хвост энергию

2. Варианты генерации уникального слова

В данной работе исследуются несколько вариантов генерации уникального слова для разработки метода точной оценки и компенсации частотного рассогласования в спутниковых системах связи.

Последовательность Уолша-Адамара – это двоичная последовательность, сгенерированная с использованием преобразования Уолша-Адамара. Преобразование Уолша-Адамара – это математическая операция, которая преобразует последовательность из N битов в другую последовательность

из N битов. Он основан на матрице Адамара, которая представляет собой квадратную матрицу размером $N \times N$ [9].

Преобразование Уолша-Адамара определяется следующим образом:

$$H = \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \right) \cdot [H_0, H_1, \dots, H_{(N-1)}], \quad (4)$$

где H_0 – матрица Адамара размером 1×1 , а каждая последующая H_k (для $k = 1$ до $N-1$) – матрица Адамара размером $2^k \times 2^k$. Такое преобразование и последовательности, генерируемые им используются в различных областях, включая обработку сигналов, сжатие данных и обнаружение/исправление ошибок. Они особенно полезны при генерации ортогональных кодов для систем связи и при построении эффективных алгоритмов для решения вычислительных задач [9,10].

Последовательность Задова-Чу (Zadoff-Chu) представляет собой сложную последовательность, обычно используемую в системах беспроводной связи, особенно в контексте мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM). В системах мобильной связи такие последовательности используются в качестве первичных и вторичных синхросигналов. Главная их особенность заключается в том, что при вычислении их корреляционной функции, она имеет четкий пик с минимальными боковыми "всплесками".

Таким образом, когда принимается входящий сигнал, который искажен различными помехами, эффектом Доплера, многолучевым приемом и т.д., содержащий Задова-Чу последовательность (как и весь сигнал), ее можно сравнить с эталонной последовательностью в памяти приемника, вычислив корреляционную функцию, и максимально очистить синхросигнал от помех. Она обладает низкой взаимной корреляцией и хорошими автокорреляционными свойствами [11]. Последовательность генерируется с использованием следующего уравнения:

$$a_q(n) = \begin{cases} \exp\left[-j2\pi q \frac{n^3/2 + \ln}{N_{ZC}}\right] (a) \\ \exp\left[-j2\pi q \frac{n(n+1)/2 + \ln}{N_{ZC}}\right] (б) \end{cases}, \quad (5)$$

где N_{ZC} – длина ZC-последовательности для чётного (а) и нечётного (б) числа соответственно, q – индекс последовательности $q = 1, \dots, N_{ZC}$; $n = 0, 1, \dots, N_{ZC} - 1$;

ZC-последовательности относятся к классу последовательностей с постоянной амплитудой и нулевой автокорреляцией (Constant Amplitude Zero Auto Correlation, CAZAC) [11,12].

Также можно использовать последовательность фазового псевдошума (PN, Phase-Noise), [9,13-14] также известную как псевдослучайная двоичная последовательность (PRBS, pseudo-random binary sequence), которая может использоваться для моделирования фазового шума в системах связи. Она представляет собой последовательность двоичных значений, которая кажется случайной, но на самом деле является детерминированной. Последовательности PN обычно используются в системах связи для различных целей, таких как скремблирование, рандомизация и синхронизация. Многочлен генератора, используемый в коде, представляет собой полином регистра сдвига с линейной обратной связью (LFSR, linear feedback shift register). LFSR – это регистр сдвига, выходной сигнал которого представляет собой линейную комбинацию значений его текущего состояния. Результирующая последовательность представляет профиль псевдослучайного фазового шума [9,13-14].

Джон Фрэнк [15] предложил многофазный код с хорошими непериодическими корреляционными свойствами и назвал этот код кодом Фрэнка. Такие кодовые последовательности получаются при пошаговой аппроксимации формы сигнала с линейной частотной модуляцией с использованием N частотных шагов и N отсчетов на частоту. Форма сигнала с кодировкой Фрэнка состоит из сигнала постоянной амплитуды, несущая

частота которого модулируется фазами кода Фрэнка. Последовательности для $N = 2$ также являются бинарными последовательностями Баркера. Фазы кода Фрэнка получаются путем умножения элементов матрицы A на основной фазовый угол $(2\pi / N)$. Реальная кодовая последовательность образуется путем размещения строк или столбцов последовательно друг за другом, длина этой последовательности при этом равна N^2 [15].

3. Исследование использования различных уникальных слов в оценке и компенсации частотного рассогласования спутниковых каналов связи

Для сравнения эффективности гибридных методов обработки сигнала с точки зрения борьбы с частотным рассогласованием необходимо уточнить эффективность предлагаемых вариантов генерации уникального слова. Сравнение проводится в условиях двух каналов: AWGN и Multipath. В системах на основе технологии ортогонального мультиплексирования с частотным разделением общая полоса пропускания делится на несколько поднесущих. Полоса пропускания каждой поднесущей обратно пропорциональна количеству поднесущих, следовательно, по мере увеличения числа поднесущих полоса пропускания каждой поднесущей уменьшается. В нашем случае частотное разделение также напрямую взаимосвязано со значением нормированных уровней частотного рассогласования, поэтому имитационное моделирование производится в условиях трех вариантов систем: 128 поднесущих при разнесении в 720 кГц, 256 поднесущих при разнесении в 360 кГц и 768 поднесущих при разнесении в 120 кГц (длина уникальных слов, нулевых хвостов или циклических префиксов $1/8$, $1/4$, $1/12$ соответственно).

В качестве методов оценки и последующей компенсации частотного представлены следующие методы [16-19]: метод оценки частотного рассогласования на основе циклических префиксов, основанный на сравнении фаз сигнала в циклическом префиксе и части DFT-s-OFDM сигнала, которая была использована для вставки защитного интервала; метод оценки частотного рассогласования Moose, алгоритм которого основан на сравнении фазовых

сдвигов между выборками БПФ в паре идентичных контрольных символов, передаваемых с разными интервалами. В частности, предлагается суммировать перекрестные произведения между выборками БПФ с одинаковым индексом и сравнивать получаемые результаты; метод оценки частотного рассогласования на основе метода Классена (Classen), основанный на вставке пилот-сигналов в частотный промежуток и предоставляющий возможность отслеживать CFO, параллельно передавая символы данных, который является модернизацией метода Moose.

4. Результаты моделирования

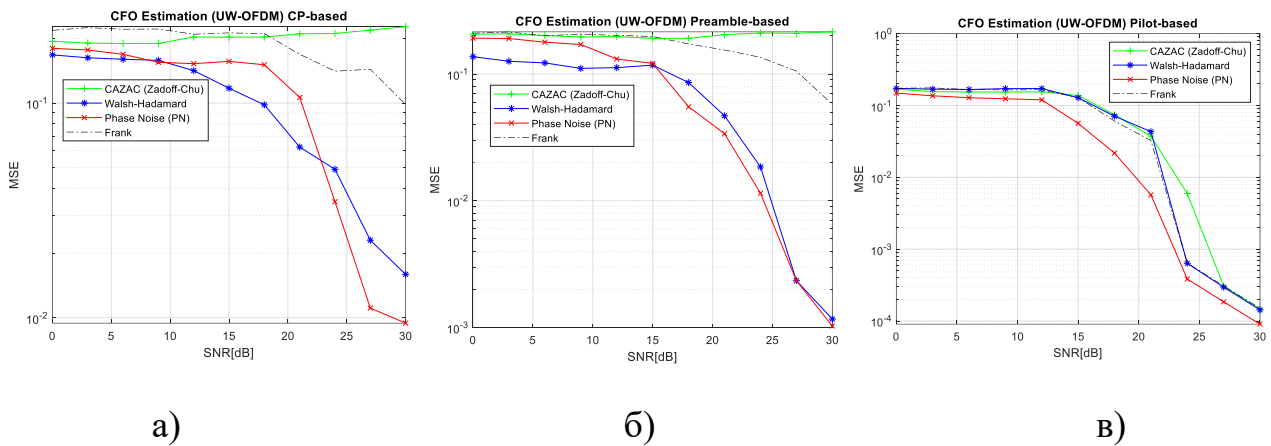


Рис. 1. Графики MSE для UW-OFDM, в канале AWGN, при разнесении в 360 кГц (256 поднесущих): а) метод оценки CP-based; б) метод оценки Moose; в) метод оценки Classen.

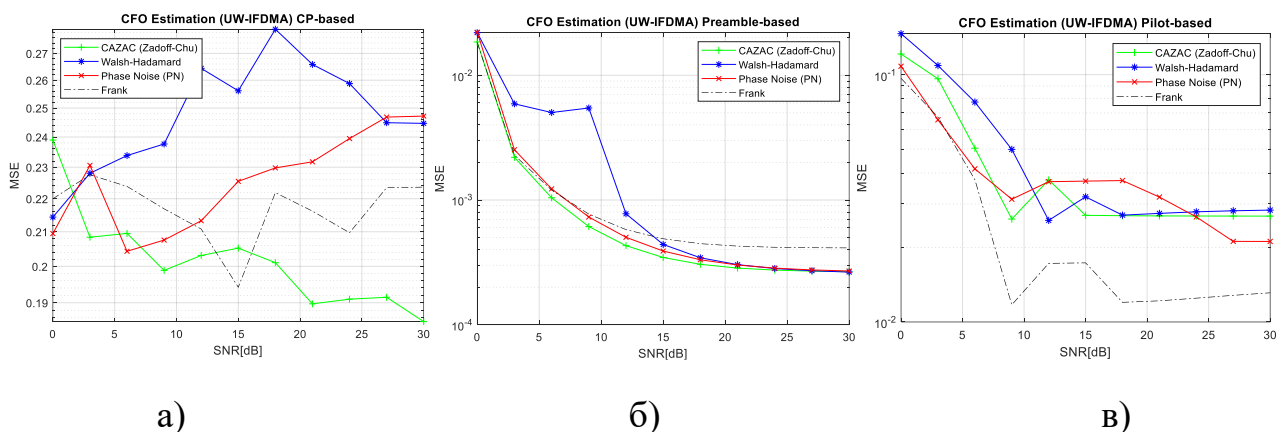


Рис. 2. Графики MSE для UW-IFDMA, в канале Multipath, при разнесении в 360 кГц (256 поднесущих): а) метод оценки CP-based; б) метод оценки Moose; в) метод оценки Classen.

Проведено имитационное моделирование, которое выявило существенные различия в эффективности различных типов уникальных слов при оценке и компенсации частотного рассогласования. В ходе экспериментальных исследований для двух вариантов каналов и трех вариантов разнесения поднесущих наиболее эффективными оказались последовательности Уолша-Адамара и фазового псевдошума, которые впоследствии использовались для сводного сравнения гибридных технологий обработки сигнала.

Исследование влияния параметров системы показало, что при разнесении 720 кГц (128 поднесущих) достигаются наилучшие результаты для всех типов последовательностей с улучшением MSE на 15-20% по сравнению с разнесением 360 кГц. Однако разнесение в 360 кГц (256 поднесущих) представляет собой оптимальный компромисс между производительностью и спектральной эффективностью, обеспечивая стабильные результаты для WN и PN последовательностей. При разнесении 120 кГц (768 поднесущих) наблюдается повышенная чувствительность к условиям канала и требуется более высокое отношение сигнал/шум.

Анализ методов оценки частотного рассогласования выявил преимущество метода Classen, который демонстрирует наилучшие результаты для UW-технологии и стабильную работу при высоких уровнях CFO в обоих типах каналов. Метод Moose показывает хорошие результаты в AWGN канале, но характеризуется снижением эффективности в Multipath канале и повышенной чувствительностью к выбору типа последовательности. Метод, основанный на использовании циклических префиксов (CP-based), оказался наименее эффективным для UW-технологии, что объясняется спецификой его работы, основанной на сравнении похожих частей OFDM-символа. В связи с этим для дальнейших исследований рекомендуется использовать методы, основанные на оценке пилот-сигналов.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность технологии Unique Word для борьбы с частотным рассогласованием в системах спутниковой связи 5G и 6G. В ходе экспериментального моделирования было установлено существенное преимущество данной технологии перед традиционными методами, особенно в условиях сложных каналов связи и высоких значений доплеровского сдвига. Это преимущество особенно заметно при использовании последовательностей Уолша-Адамара и фазового псевдошума, которые обеспечивают минимальные значения среднеквадратической ошибки при оценке частотного рассогласования.

Значительный практический интерес представляет тот факт, что метод оценки CFO на основе алгоритма Classen в сочетании с технологией UW демонстрирует наилучшие результаты как в канале AWGN, так и в условиях многолучевого распространения. Это свидетельствует о универсальности и надежности предложенного подхода в различных условиях эксплуатации.

Дальнейшее развитие данного направления исследований представляется перспективным в нескольких аспектах. Первостепенное значение имеет разработка адаптивных алгоритмов выбора параметров UW, что позволит оптимизировать работу системы в реальном времени. Существенный интерес представляет также исследование возможности применения гибридных последовательностей, что потенциально может привести к дальнейшему улучшению характеристик системы. Важным направлением является оптимизация технологии для конкретных сценариев использования в сетях 6G, а также интеграция UW с другими перспективными технологиями обработки сигналов, что открывает новые возможности для повышения эффективности систем спутниковой связи следующего поколения.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Литература

1. Tong W., Zhu P. 6G: The Next Horizon. – 2021.
2. 3rd Generation Partnership Project Technical Specification Group Radio Access Network. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz // document ETSI TR 138 901 v17.0.0 (2022-04) – 2022.
3. Chen X., Li A., Gao G., Al Amin A., Shieh W. Unique-word DFT-Spread OFDM for Ultra-high Speed Optical Transmission // Opto-Electronics and Communications Conference. – 2012. <https://doi.org/10.1109/OECC.2012.6276416>
4. Сальников Р. О., Мешков И. К., Гизатулин А. Р. Разработка Методов Оценки и Компенсации Частотного и Временного Рассогласования в Системах Связи 6G С Технологией DFT-s-OFDM // Мавлютовские чтения: Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Уфа, 25–27 октября 2022 года. Том 3. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 276-282. – EDN BFMBKC.
5. Berardinelli G., et. al. Zero-tail DFT-spread-OFDM signals // IEEE Globecom Workshops. – 2013. – P. 229-234. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6824991>
6. Şahin A., et. al. Flexible DFT-S-OFDM: Solutions and Challenges // IEEE Communications Magazine. – 2016. – P. 106-112. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600330CM>
7. Şahin A., et. al. An Improved Unique Word DFT-Spread-OFDM Scheme for 5G Systems // IEEE Globecom Workshops. – 2015. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2015.7414173>
8. Şahin A., et. al. A Comparison of SC-FDE and UW DFT-s-OFDM for Millimeter Wave Communications // IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2018. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422672>
9. Proakis J.G., Manolakis D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications // Pearson Education. – 2007. – 4th Edition.
10. Chaparro L.F., Akan A. Signals and Systems Using MATLAB // Elsevier. – 2019. – 3rd Edition. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00826-1>
11. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы // Горячая линия – Телеком. – 2014. – 242 с.

12. Рыжков А.Е. и др. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа //СПбГУТ. – 2015. – 256 с.
13. Khan M.A., Davies R., Hassan F. Securing Wireless Signals using Artificial Phase Noise //IEEE Computing and Communication Workshop and Conference. – 2022. – P. 0943-0947. <https://doi.org/10.1109/CCWC54503.2022.9720754>
14. Ng H.J., Feger R., Stelzer A. A Fully-Integrated 77-GHz UWB Pseudo-Random Noise Radar Transceiver With a Programmable Sequence Generator in SiGe Technology //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2014. – Vol. 61(8). – P. 2444-2455. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2014.2309774>
15. Shubhaker B. Phase Coded Radar Signals – Frank Code & P4 Codes //International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. – 2017. Доступно онлайн по адресу: <https://www.ijariit.com/manuscript/phase-coded-radar-signals-frank-code-p4-codes/>
16. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB //IEEE Press John Wiley & Sons. – 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470825631>
17. Davey C.P., et. al Using Sequence-to-Sequence Models for Carrier Frequency Offset Estimation of Short Messages and Chaotic Maps //IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 119814-119825. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3221762>
18. Rotem A., Dabora R. A Novel Low-Complexity Estimation of Sampling and Carrier Frequency Offsets in OFDM Communications //IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 194978-194991. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032748>
19. Yoon J., Lee C., Kim Y.H. Recovery of carrier frequency offset and set information for LTE device-to-device communications //Journal of Communications and Networks. – 2019. – Vol. 21(1). – P. 1-11. <https://doi.org/10.1109/JCN.2019.000001>

Для цитирования:

Сальников Р.О., Мешков И.К., Гизатулин А.Р., Султанов А.Х., Тимофеев А.Л., Мешкова А.Г. Разработка и исследование метода компенсации частотного рассогласования на основе использования уникальных слов в системах спутниковой связи 5G и 6G. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.10>