

Разработка метода снижения пик-фактора сигнала для ортогональных методов доступа на основе использования формирующих фильтров в гибридных сетях связи¹

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

Уфимский университет науки и технологий

Аннотация: В данной работе представлен метод снижения пик-фактора (PAPR) в гибридных спутниковых сетях связи с использованием методов ортогонального доступа и формирующих фильтров. Предложенный подход объединяет гибкие защитные интервалы и методы формирующей фильтрации для оптимизации передачи сигналов в низкоорбитальных спутниковых сетях. Исследованы несколько типов фильтров, включая приподнятый косинус (RC), корень из приподнятого косинуса (RRC), «улучшенный» приподнятый косинус (BTRC) и его оптимизированная версия (OBTRC). Предложен новый вариант формирующего фильтра на базе OBTRC. Метод оценивается с использованием технологий OFDM и DFT-s-OFDM с модификациями нулевого хвоста и уникального слова. Результаты моделирования показывают снижение PAPR на 0.5-2 дБ по сравнению с традиционными подходами.

Ключевые слова: OFDM, DFT-s-OFDM, Zero-tail, Unique Word, низкоорбитальные спутники, гибридные телекоммуникационные сети, 5G NR, 6G.

Для цитирования: Сальников Р. О., Мешков И. К., Гизатулин А. Р., Султанов А. Х., Тимофеев А. Л., Мешкова А. Г. Разработка метода снижения пик-фактора сигнала для ортогональных методов доступа на основе использования формирующих фильтров в гибридных сетях связи // Вестник СибГУТИ. 2026. Т. 20, № 2. С. 45–60. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-2-45-60>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Сальников Р. О., Мешков И. К.,
Гизатулин А. Р., Султанов А. Х.,
Тимофеев А. Л., Мешкова А. Г., 2026

Статья поступила в редакцию 12.03.2026;
переработанный вариант – 07.05.2026;
принята к публикации 08.05.2026.

1. Введение

Развитие сетей связи 5G и 6G направлено на обеспечение трех ключевых сценариев: расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB), сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC) и массовой межмашинной связи (mMTC). Для обеспечения глобального покрытия предлагается интеграция наземных и спутниковых сетей связи [1]. При организации доступа к неназемной сети (Non-Terrestrial Network, NTN) используются следующие элементы [2-5]: терминал NTN; служебная линия между пользовательским оборудованием и космической платформой; межспутниковые линии связи; шлюзы, соединяющие спутнико-

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01149, <https://rscf.ru/project/25-29-01149/>

вую сеть с базовой; фидерные линии между шлюзами и космической платформой. Существует несколько вариантов интеграции, они показаны на рис. 1–3.

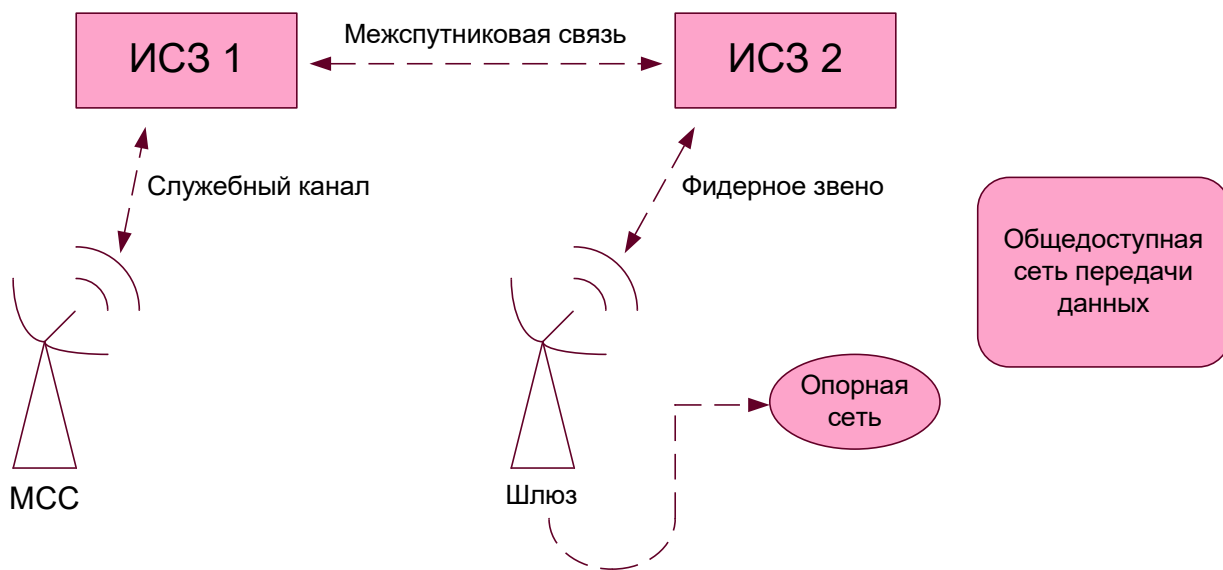


Рис. 1. Сеть спутникового доступа с межспутниковыми каналами связи (Inter Satellite Link, ISL) со служебной линией, работающей в полосах частот выше 6 ГГц, выделенных для фиксированных и подвижных спутниковых служб (ФСС и ПСС)

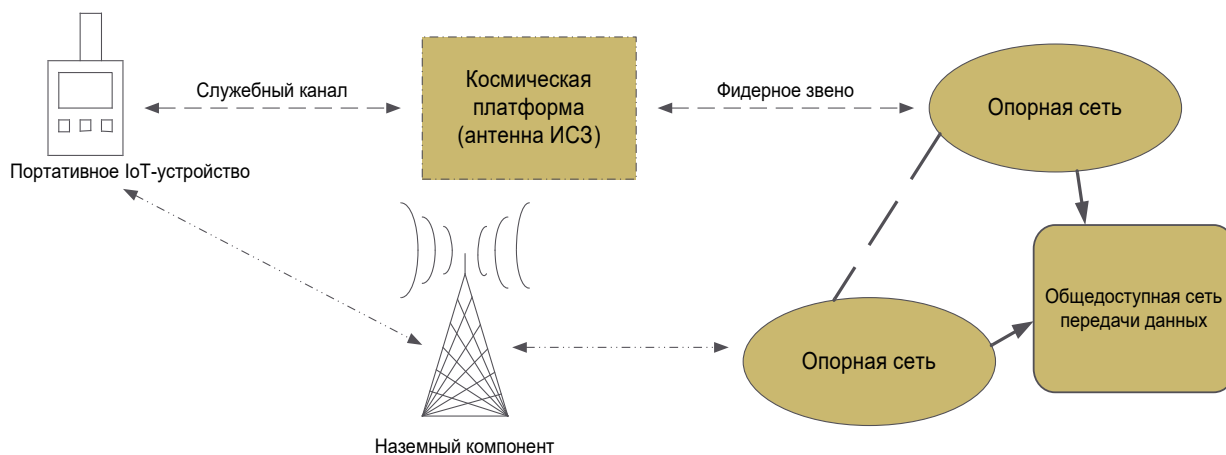


Рис. 2. Сеть спутникового доступа, служебный канал которой работает в полосе частот ниже 6 ГГц, выделенной для подвижных спутниковых служб (ПСС) и дополненной наземной сетью доступа, обслуживаемой той же или независимыми базовыми сетями

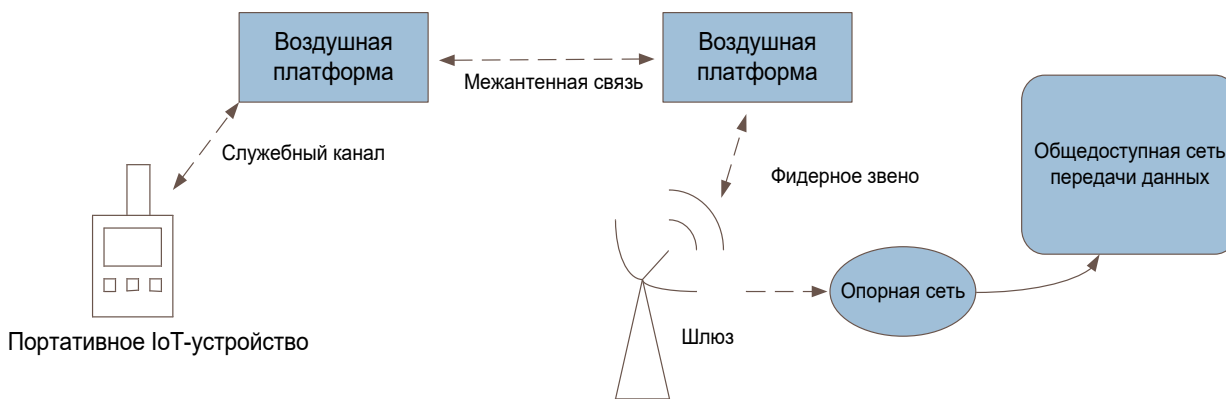


Рис. 3. Сеть воздушного доступа (Inter Airborne Link, IAL) со служебным каналом, работающим в полосах частот ниже или выше 6 ГГц

2. Использование технологий на базе OFDM

В современных системах связи используются различные вариации технологий обработки сигнала на базе технологии OFDM. Сигналы OFDM характеризуются высокими пиковыми значениями во временной области из-за сложения множества поднесущих при обратном преобразовании Фурье. Высокий уровень пик-фактора (Peak to Average Power Ratio, PAPR) снижает эффективность усилителей мощности и АЦП/ЦАП, что особенно критично для мобильных устройств с ограниченным зарядом батареи [7].

В нисходящем канале LTE и 5G NR, являющихся ключевыми стандартами, в которых уже реализована интеграция наземных и спутниковых сетей связи, применяется CP-OFDM, а в восходящем – DFT-s-OFDM [8], которая использует предварительное кодирование с помощью дискретного преобразования Фурье для уменьшения PAPR. Существуют модификации DFT-s-OFDM с нулевыми хвостами (Zero-Tail, ZT-DFT-s-OFDM) и уникальными словами (Unique Word, UW-DFT-s-OFDM), позволяющие дополнительно улучшить энергетические характеристики сигнала [8-10].

Для будущих сетей связи 6 поколения предполагается поиск и разработка совершенно новых методов ортогонального и неортогонального доступа, позволяющих повысить дополнительно как энергетическую эффективность, так и спектральную используемых частотных каналов связи. Одним из таких методов может стать предлагаемый в данной работе метод, основанный на использовании усовершенствованных технологий DFT и формирующих фильтров, которые позволят значительно снизить PAPR по сравнению со стандартным OFDM и DFT-s-OFDM [1].

3. Методы компенсации PAPR

В литературе представлены известные варианты компенсации пик-фактора. Простейший метод снижения PAPR – клиппинг (ограничение амплитуды сигнала на фиксированном уровне, или её нелинейное насыщение вокруг пиков), однако он вызывает искажения и нарушает ортогональность поднесущих [7].

Кодирование с использованием специальных кодовых слов (например, последовательностей Zadoff-Chu) позволяет уменьшить PAPR без искажений, но снижает скорость передачи и требует сложных таблиц кодирования [7, 11]. Метод скремблирования (вероятностный) снижает вероятность высокого возникновения PAPR путем выбора символов блока входных данных OFDM с минимальным значением, но не гарантирует его уровень ниже заданного. К тому же метод страдает от внеполосной мощности, спектральная эффективность снижается, а сложность возрастает по мере увеличения числа поднесущих [7].

Адаптивное предискажение компенсирует нелинейность усилителя мощности путем автоматической подстройки группировки входных сигналов с наименьшими требованиями к оборудованию (RAM и кодировщик поиска в памяти), что улучшает сходимость и уменьшает ошибки. Эти показатели также могут быть уменьшены за счет использования технологии широкополосной передачи и разработки соответствующих обучающих сигналов [7].

Технология Selective Mapping (SLM) позволяет снизить уровень PAPR за счет селективного отображения символов на поднесущие в зависимости от их фазовых отношений без потери скорости передачи. Тем не менее технология имеет ограниченную эффективность по сравнению с другими методами и чувствительность к условиям канала и шуму. SLM широко используется в различных коммуникационных системах, включая WLAN, сотовые сети и PLC [12].

4. Формирующая фильтрация

В современных OFDM-системах формирующая фильтрация применяется в первую очередь для подавления интерференции между несущими частотами (ICI), вызванной частот-

ным рассогласованием, а также для улучшения спектральных характеристик сигнала [13–15]. Однако следует отметить, что любая линейная формирующая фильтрация сигнала, даже при сохранении его ортогональной структуры, неизбежно увеличивает пик-фактор [15–17]. Это связано с расширением импульсной характеристики во времени и, как следствие, с увеличением вероятности интерференции между соседними несущими [14–15].

В данной работе рассматривается фильтрация уже сформированного OFDM/DFT-s-OFDM-сигнала. Такой подход соответствует современным концепциям гибридных форматов, представленным в работах [18–19], и позволяет гибко управлять спектральными и энергетическими характеристиками сигнала без изменения структуры модулятора. Сигнал после обратного преобразования Фурье (IFFT) и добавления циклического префикса подвергается линейной фильтрации во временной области. Эта операция математически описывается как свёртка временного сигнала с импульсной характеристикой формирующего фильтра. Ниже представлена математическая модель IFDMA (Interleaved Frequency Division Multiple Access, множественный доступ с чередующимся частотным разделением) с использованием формирующей фильтрации RC-фильтром:

$$x_l^{RC}(t) = \left[\sum_{k=0}^{N-1} X_{l,k} e^{j2\pi k \Delta f (t - lT_{sym})} \right] * h_{RC}(t) \quad (1)$$

где $X_{l,k}$ это представление IFDMA, рассмотрим его подробнее. Из временных отсчетов $x[m]$ при помощи дискретного преобразования Фурье формируется сигнал $X[k]$, в последствии распределяемый, как:

$$\tilde{X}[k] = \begin{cases} X[k/S], k = S \cdot m_1, m_1 = 0, 1, 2, \dots, M-1 \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

Выходная последовательность $\tilde{x}[n]$, получаемая в результате обратного преобразования Фурье, где $n = M \cdot s + m$ для $s = 0, 1, 2, \dots, S-1$ и $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$ может быть выражена следующей аналитической моделью:

$$\begin{aligned} \tilde{x}[n] &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}_k e^{j2\pi \frac{n}{N} k} = \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \frac{n}{M} m_1} = \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \frac{Ms+m}{M} m_1} = \\ &= \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \frac{m}{M} m_1} \right) = \frac{1}{S} \cdot x[m] \end{aligned} \quad (3)$$

Выходная последовательность оказывается повторением исходного входного сигнала в масштабе $1/S$ во временной области.

В IFDMA сопоставление поднесущих начинается с r -й поднесущей ($r = 0, 1, 2, \dots, S-1$), поэтому символ дискретного преобразования Фурье в данном случае будет выражаться так:

$$\tilde{X}[k] = \begin{cases} X[(k-r)/S], k = S \cdot m_1 + r, m_1 = 0, 1, 2, \dots, M-1 \\ 0, \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

а выходная последовательность будет выражена следующей аналитической моделью:

$$\begin{aligned} X_{l,k} = \tilde{x}[n] &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}_k e^{j2\pi \frac{n}{N} k} = \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \left(\frac{n}{M} m_1 + \frac{n}{M} r \right)} = \\ &= \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \frac{Ms+m}{M} m_1} e^{j2\pi \frac{n}{M} r} = \\ &= \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{1}{M} \sum_{m_1=0}^{M-1} X[m_1] e^{j2\pi \frac{m}{M} m_1} \right) e^{j2\pi \frac{n}{M} r} = \frac{1}{S} e^{j2\pi \frac{n}{M} r} \cdot x[m] \end{aligned} \quad (5)$$

Откуда видно, что частотный сдвиг начальной точки распределения поднесущих на количество r приводит к изменению фазы на значение, равное $e^{j2\pi\frac{n}{M}r}$. Импульсная характеристика формирующего фильтра для выражения (1) описывается совокупностью формул:

$$h_{RC}(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos\left(\pi\left(t + \beta T_{sym} + T_G\right) / \beta T_{sym}\right) \\ 1.0 \\ 0.5 + 0.5 \cos\left(\pi\left(t - T_{sub} + \beta T_{sym}\right) / \beta T_{sym}\right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} -(T_G + \beta T_{sym} / 2) \leq t \leq -(T_G - \beta T_{sym} / 2) \\ -(T_G + \beta T_{sym} / 2) \leq t \leq (T_{sub} - \beta T_{sym} / 2) \\ (T_{sub} - \beta T_{sym} / 2) \leq t \leq (T_{sub} + \beta T_{sym} / 2) \end{cases} \quad (7)$$

где β – коэффициент спада (roll-off factor), T_{sub} – длительность символа OFDM без защитного интервала, T_G – длительность циклического префикса в пересчете на выборки, и $T_{sym} = T_{sub} + T_G$ – длительность расширенного циклическим префиксом символа OFDM.

Остальные импульсные характеристики рассматриваемых фильтров, таких как корень из приподнятого косинуса (Root Raised Cosine, RRC), а также фильтры класса «лучше, чем приподнятый косинус» («Better than» Raised Cosine, BTRC и Optimized «Better than» Raised Cosine, OBTRC) приведены в работах [13-15].

В условиях спутниковых каналов связи, характеризующихся многолучевым распространением, ионосферными возмущениями и частотно-селективными замираниями, формирующий фильтр должен обеспечивать быстрое затухание импульсной характеристики для минимизации межсимвольной интерференции (МСИ). МСИ не только ухудшает достоверность приёма, но и увеличивает пик-фактор (PAPR): наложение искажённых копий символов приводит к резким выбросам мгновенной мощности, что особенно критично для нелинейных усилителей спутниковых терминалов [20-21].

В данной работе ставится задача снизить уровень PAPR для OFDM/DFT-s-OFDM, не допуская ухудшения характеристик подавления интерференции между несущими частотами более чем на 0.5 дБ по отношению к сигналу, обработанному классическим OBTRC-фильтром. Особое внимание уделено фильтру OBTRC (Optimized «Better than» Raised Cosine), предложенному в [14], который содержит дополнительный настраиваемый параметр, позволяющий управлять формой импульса. Именно на его основе разработан предлагаемый вариант формирующего фильтра для интеграции в гибридные системы.

На основе анализа, проведенного в [14], параметр n обычно выбирается из условия максимизации отношения сигнал/интерференция (SIR) усреднённо по всем возможным значениям частотного смещения (8).

$$h_{OBTRC}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & 0 \leq |t| \leq \frac{T(1-\alpha)}{2} \\ \frac{1}{T} \exp\left(\gamma_n \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)^n\right), & \frac{T(1-\alpha)}{2} \leq |t| \leq \frac{T}{2} \\ \frac{1}{T} \left\{ 1 - \exp\left(\gamma_n \left(\frac{T(1+\alpha)}{2} - |t|\right)^n\right) \right\}, & \frac{T}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+\alpha)}{2} \end{cases} \quad (8)$$

где:

$$\gamma_n = -\frac{2n \ln 2}{(\alpha T)^n} \quad (9)$$

В условиях спутниковых систем, где доплеровский сдвиг может быть определен с высокой точностью [22-23], что позволяет использовать ОБТРС-фильтр, оптимизированный для конкретного диапазона доплеровских смещений, без необходимости усреднения по всему спектру возможных значений.

В современных системах OFDM и DFT-s-OFDM для снижения пик-фактора (PAPR) и подавления внеполосных излучений (ООВ) широко применяются оконные функции во временной области. Работа [24] заложила теоретические основы выбора окон, показав, что окно Тьюки обеспечивает гибкий компромисс между спектральной локализацией и подавлением боковых лепестков за счёт сохранения «плато» в центре и плавного затухания на краях. Эта особенность делает его особенно привлекательным для задач формирующей фильтрации, где критически важно сохранить центральную часть импульса, отвечающую за ортогональность поднесущих. В последнее время окно Тьюки активно используется в спутниковых и наземных системах связи. Так, в работах [25–28] оно применяется глобально к полному OFDM-символу для снижения PAPR и ООВ в DFT-s-OFDM с нулевым префиксом.

В отличие от представленных работ, предлагаемый подход использует окно Тьюки локально – только в переходных зонах импульсной характеристики ОБТРС. Это позволяет сохранить плоскую центральную часть, критичную для подавления ICI, и целенаправленно сглаживать лишь те участки, которые вносят основной вклад в формирование пиковых выбросов мощности. Такая стратегия сочетает преимущества ОБТРС-фильтрации и локального оконного сглаживания, что обеспечивает эффективное снижение PAPR без ухудшения помехоустойчивости.

Для этого в (8) дополнительно вводится параметр $\mu \in [0, 1]$, управляющий степенью локального сглаживания переходных участков импульсной характеристики ОБТРС через влияние на коэффициент сужения α_{Tukey} окна Тьюки:

$$\alpha_{Tukey} = 1 - \mu \quad (10)$$

При $\mu = 1$ фильтр совпадает с классическим ОБТРС; при $0 < \mu < 1$ форма импульса изменяется, что приводит к снижению пиковых значений сигнала, но незначительно ухудшает подавление ICI. Параметр подбирается итеративным методом, он взаимосвязан с уровнем коэффициента спада фильтра. Таким образом, предложенный подход позволяет настраивать компромисс между уровнем PAPR и устойчивостью к ICI в зависимости от требований конкретной системы.

Импульсная характеристика ЕОБТРС задается функцией, определенной на интервале:

$$t \in \left[-\frac{T(1+\alpha)}{2}, \frac{T(1+\alpha)}{2} \right] \quad (11)$$

где T – длительность символа, $\alpha \in (0, 1]$ – коэффициент спада (roll-off фактор).

Функция имеет кусочно-заданную структуру, основанную на представлении, описанном в статье [14]. Переходные участки модифицированы множителем на основе окна Тьюки [25–28]:

$$h_{EOBTRC} = \begin{cases} \frac{1}{T}, \\ \frac{1}{T} \exp\left(\gamma_n \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)^n\right) \cdot w_2(t), & |t| \leq t_1, \\ \frac{1}{T} \exp\left(\gamma_n \left(|t| - \frac{T(1-\alpha)}{2}\right)^n\right) \cdot w_2(t), & t_1 < |t| \leq t_2, \\ \frac{1}{T} \left[1 - \exp\left(\gamma_n \left(\frac{T(1+\alpha)}{2} - |t|\right)^n\right)\right] \cdot w_3(t), & t_2 < |t| \leq t_3, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (12)$$

Локально применяемые окна Тьюки $w_2(t)$ и $w_3(t)$ описываются системами уравнений (13) и (14):

$$w_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha_{Tukey}} \left(\tau_2 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2}\right)\right)\right], & 0 \leq \tau_2 \leq \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \\ 1, & \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \leq \tau_2 \leq 1 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha_{Tukey}} \left(\tau_2 - 1 + \frac{\alpha_{Tukey}}{2}\right)\right)\right], & 1 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \leq \tau_2 \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$w_3(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha_{Tukey}} \left(\tau_3 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2}\right)\right)\right], & 0 \leq \tau_3 \leq \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \\ 1, & \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \leq \tau_3 \leq 1 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha_{Tukey}} \left(\tau_3 - 1 + \frac{\alpha_{Tukey}}{2}\right)\right)\right], & 1 - \frac{\alpha_{Tukey}}{2} \leq \tau_3 \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

Поскольку длительность переходных зон зависит от параметров T и α , окно строится не в абсолютном времени, а в нормированных (относительных) временных координатах τ_2 и τ_3 , которые линейно отображают время на единичный интервал, соответствующий границам переходных зон:

$$\tau_2 = \frac{|t| - t_1}{t_2 - t_1} \in [0, 1] \quad (15)$$

$$\tau_3 = \frac{t_3 - |t|}{t_3 - t_2} \in [0, 1] \quad (16)$$

где введены следующие обозначения:

$$t_1 = \frac{T(1-\alpha)}{2}; t_2 = \frac{T}{2}; t_3 = \frac{T(1+\alpha)}{2}; \quad (17)$$

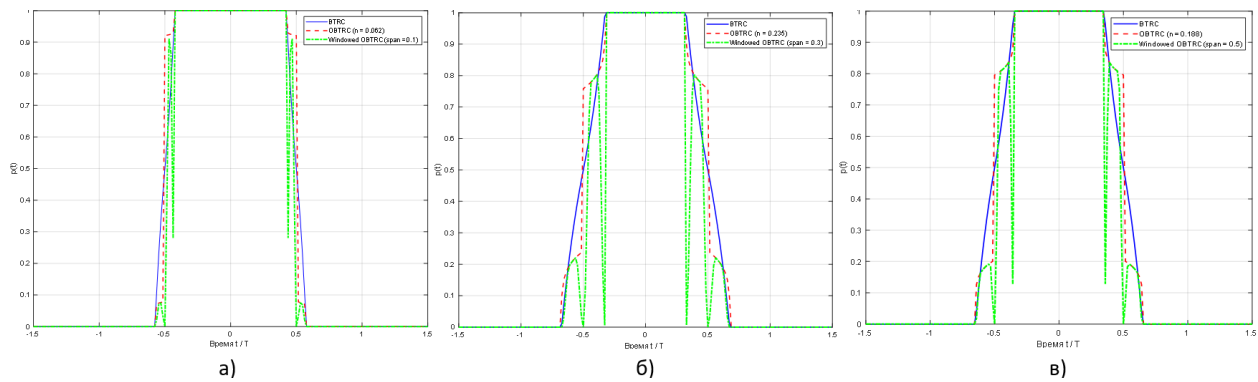


Рис. 4. Импульсные характеристики фильтров BTRC, OBTRC и Enhanced OBTRC при а) $\alpha = 0.15$, $\mu = 0.1$; б) $\alpha = 0.35$, $\mu = 0.3$; в) $\alpha = 0.3$, $\mu = 0.5$

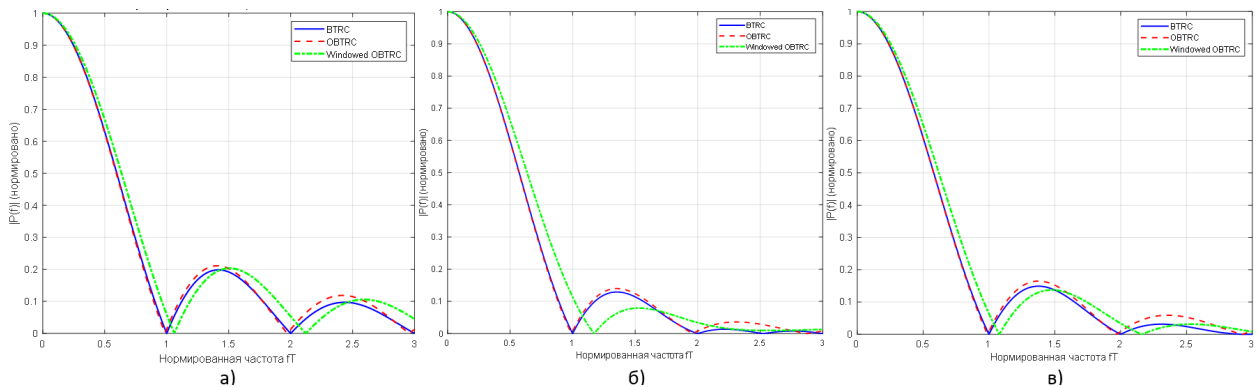


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики фильтров BTRC, OBTRC и Enhanced OBTRC при разных коэффициентах спада при а) $\alpha = 0.15$, $\mu = 0.1$; б) $\alpha = 0.35$, $\mu = 0.3$; в) $\alpha = 0.3$, $\mu = 0.5$

Рисунки 4 и 5 иллюстрируют временные и частотные характеристики импульсов BTRC, OBTRC и предложенного Enhanced OBTRC при различных значениях параметра сглаживания μ . Анализ показывает, что переход от BTRC к OBTRC обеспечивает значительное улучшение подавления межсимвольной интерференции (ISI) за счёт более плавных временных переходов и снижения амплитуды боковых лепестков в частотной области. Предложенный Enhanced OBTRC дополнительно модифицирует импульс путём локального применения окна Тьюки к переходным зонам (подъёму и спаду), что приводит к изменению формы во временной области. При этом ширина основного лепестка частотной характеристики сохраняется близкой к OBTRC, что гарантирует приемлемое подавление интерференции. Таким образом, Enhanced OBTRC реализует оптимальный компромисс между энергоэффективностью передатчика (благодаря снижению PAPR) и спектральной эффективностью системы (благодаря узкому главному лепестку и низким боковым лепесткам).

Также в работе анализируется совместное применение формирующих фильтров и гибких защитных интервалов, описанных в статьях [8-10]. Показано влияние синергетического эффекта, позволяющего использовать преимущества структуры сигналов с UW/ZT для снижения уровня PAPR сигналов OFDM/DFT-s-OFDM, сохраняя при этом высокую устойчивость к доплеровскому смещению за счёт оптимизированной спектральной локализации фильтра. Использование нулевых хвостов в DFT-s-OFDM вместе с формирующей фильтрацией позволяет управлять спектральным составом сигнала, сглаживать пиковые значения и уменьшать разброс мощности, что повышает точность оценки частотного рассогласования [29].

5. Результаты моделирования

Имитационное моделирование проведено в среде Matlab [7, 30] и выполняет ряд операций, связанных с моделированием систем. Анализируются технологии на базе OFDM и DFT-s-OFDM, а также их гибридные модификации с использованием нулевых хвостов (ZT) и уникальных слов (UW), с применением различных формирующих фильтров: RC, RRC, BTRC, OBTRC и усовершенствованного OBTRC (Enhanced OBTRC, EOBTRC).

К другим используемым в моделировании данным относятся форма излучаемого сигнала, которую можно изменять вариативно (LFDMA, IFDMA), количество поднесущих – 512, порядок модуляции – QAM-16, несущая частота (4,8 ГГц, [31]), отношение сигнал/шум на промежутке от 0 до 15 дБ, а также параметры предложенных фильтров и т.д. Все исследования проводились при коэффициенте спада фильтра, равном 0.3 и μ , равном 0.5.

Рассматривались как модели уровня пик-фактора в передатчике, так и модели уровня деградации пик-фактора в каналах Райса и Рэля [29, 32, 33–34]). Оценка вероятности битовой ошибки проведена в канале с райсовским рассеянием. Так как моделируется канал для связи со спутником, находящимся на низкой околоземной орбите, то значения скорости движения спутника приняты за 7556,2 м/с или 27202,32 км/ч (высота орбиты 600 км).

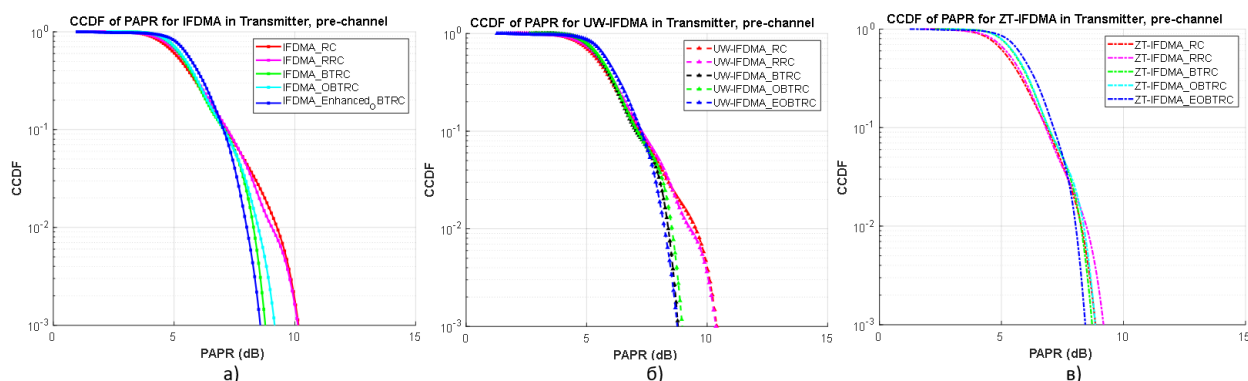


Рис. 6. Графики зависимости PAPR к CCDF на передатчике для: а) IFDMA; б) UW-LFDMA; в) ZT-IFDMA

На рисунках 6 (а–в) представлены результаты для технологий IFDMA, UW-IFDMA и ZT-IFDMA, соответствующие оценке PAPR на передающей стороне. Наиболее заметные улучшения при использовании фильтра «улучшенный OBTRC» достигнуты именно для IFDMA и гибридных технологий на основе этого метода распределения. Применение фильтра приводит к снижению уровня PAPR: при вероятности превышения $CCDF = 10^{-3}$ значение пик-фактора для EOBTRC превосходит варианты BTRC и OBTRC на 0.2–0.5 дБ. При этом разница с классическими RC и RRC на том же уровне составляет от 1 до 2 дБ. Вышеописанное преимущество EOBTRC справедливо для всех представленных рисунков.

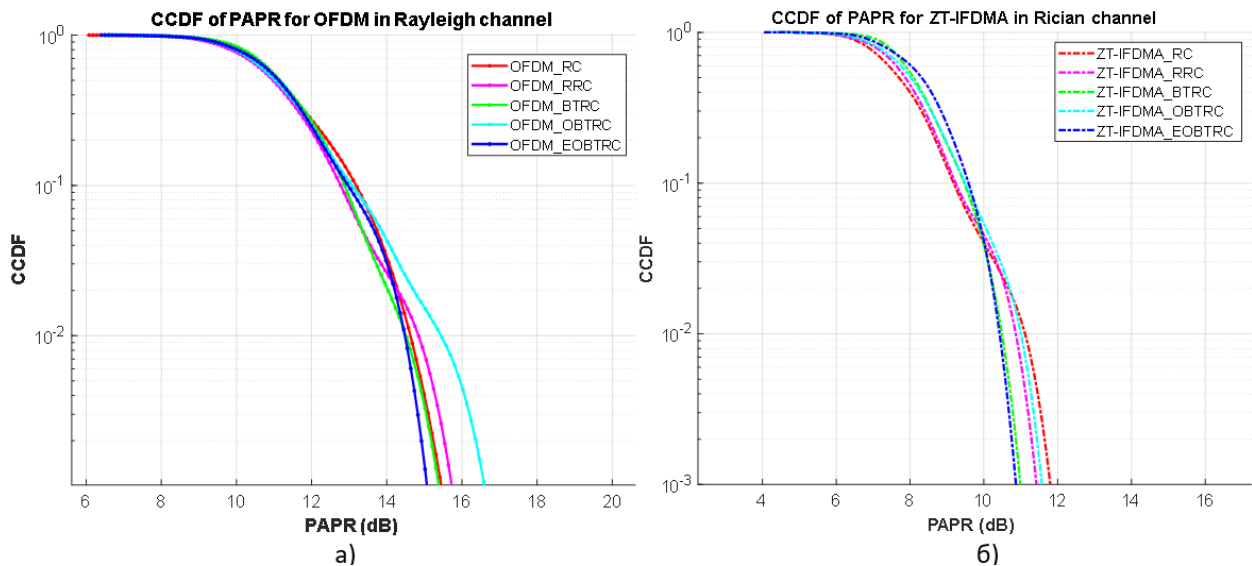


Рис. 7. Графики зависимости PAPR к CCDF для: а) OFDM в Рэлеевском канале; б) ZT-IFDMA в Райсовском канале

Помимо оценок уровня пик-фактора на передающей стороне также оценено влияние канала. На рисунках 7 (а–б) представлены результаты для технологий OFDM и ZT-IFDMA, соответствующие оценке PAPR в канале Рэля и Райса. Применение фильтра ЕОВТРС в данных случаях также приводит к снижению уровня PAPR. При вероятности превышения $CCDF = 10^{-3}$ значение PAPR для ЕОВТРС составляет около 15 дБ, что меньше результатов для остальных фильтров на этом же уровне вероятности с разницей от 0.2 до 1.2 дБ.

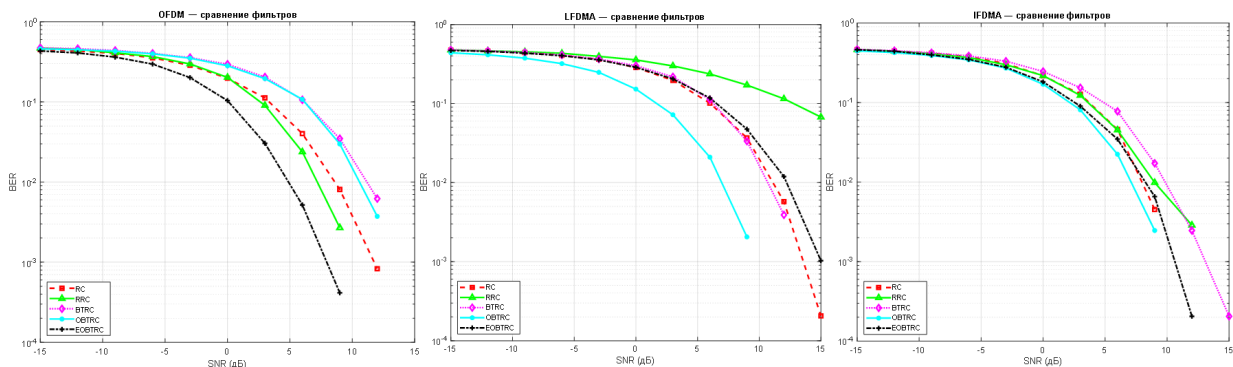


Рис. 8. Графики зависимости вероятности битовой ошибки: а) ZT-OFDM в Райсовском канале; б) ZT-IFDMA в Райсовском канале; в) UW-IFDMA в Райсовском канале

Исходя из рисунков 8 (а–в) можно сделать вывод, что предложенный фильтр ЕОВТРС снижая уровень PAPR, не повышает вероятность битовой ошибки в сигнале. Фильтр обеспечивает улучшенные или сопоставимые характеристики помехоустойчивости по сравнению с классическими и оптимизированными фильтрами, на базе которых он был построен, что подтверждает его практическую ценность для использования в гибридных сетях связи.

Этот результат подтверждает, что фильтр ЕОВТРС не только превосходит классические решения, но и способен улучшить характеристики даже по отношению к оптимизированным современным фильтрам.

Заключение

Исходя из полученных результатов, представленных на рисунках 6 (а–в) и 7 (а, б) можно сделать вывод, что для ретрансляции данных в новых конвергентных сетях пятого и

шестого поколения между мобильным абонентом и низкоорбитальными спутниковыми сегментами в условиях значительного влияния доплеровского сдвига частот с точки зрения борьбы с высокими уровнями PAPR возможно использование как DFT-s-OFDM и гибридных вариаций UW-DFT-s-OFDM и ZT-DFT-s-OFDM так и гибридных вариаций на базе OFDM и гибридов с формирующей фильтрацией.

Применение разработанного фильтра EOBTRC обеспечивает снижение пик-фактора на 0.5–2 дБ относительно классических решений (RC/RRC) и на 0.2–0.5 дБ относительно оптимизированного фильтра OBTRC при вероятности превышения порога в 10 дБ порядка 10^{-3} – 10^{-5} , что должно помочь в упрощении схемотехнической подготовки выходных каскадов спутниковых терминалов.

При этом подтверждено, что достигнутое снижение PAPR не сопровождается деградацией помехоустойчивости: вероятность битовой ошибки в каналах Рэля и Райса сохраняется на уровне или ниже базовых аналогов, а подавление межсимвольной и межканальной интерференции не ухудшается более чем на 0.5 дБ.

Полученные данные свидетельствуют о практической применимости предложенного метода в гибридных системах связи, где ограничения по энергопотреблению, массе и габаритам абонентского оборудования являются критическими, а требования к надёжности и спектральной эффективности – повышенными.

Таким образом, разработанный подход может служить базовым решением для физического уровня перспективных конвергентных сетей, обеспечивая баланс между энергоэффективностью передатчика, устойчивостью к доплеровскому сдвигу и совместимостью с существующей инфраструктурой стандартов 5G NR и 6G.

Литература

1. *Тон В., Zhu P.* 6G: The next horizon. – 2021.
2. *Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А.* Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 190–255.
3. *Ань Н. Д., Ершов А. В.* Система «Марафон IoT» и новый рынок спутникового IoT // Технологии и средства связи. 2021. № S1. С. 75–80.
4. *Ozger M. et al.* 6G for connected sky: a vision for integrating terrestrial and non-terrestrial networks // 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). IEEE, 2023. P. 711–716.
5. *Alfattani S. et al.* Multi-mode high altitude platform stations (HAPS) for next generation wireless networks // arXiv preprint arXiv:2210.11423. 2022.
6. *Sattarzadeh A. et al.* Satellite-based non-terrestrial networks in 5G: insights and challenges // IEEE Access. 2021. V. 10. P. 11274–11283.
7. *Cho Y. S. et al.* MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.
8. *Сальников Р. О. и др.* Анализ методов снижения пик-фактора сигнала в условиях влияния эффекта Доплера в гибридных сетях связи // Physics of Wave Processes and Radio Systems. 2024. Т. 27. № 3. С. 61–70.
9. *Berardinelli G.* Generalized DFT-s-OFDM waveforms without cyclic prefix // IEEE Access. 2017. V. 6. P. 4677–4689.
10. *Kumar U. et al.* A waveform for 5G: guard interval DFT-s-OFDM // 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2015. P. 1–6.
11. *Singh R. et al.* PAPR reduction for OFDM communication system based on ZCT-pre-coding scheme // 2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC). IEEE, 2021. P. 555–558.

12. *Kumar N. et al.* Fusion of adaptive SLM technique with companding for PAPR reduction in 5G MIMO-OFDM system // 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT). IEEE, 2023. P. 1–5.
13. *Lee S. J., Beaulieu N. C.* Performance comparison of non-data-aided symbol timing-error detection for the raised-cosine and "better than" raised-cosine pulses // IEEE Transactions on Communications. 2009. V. 57. № 5. P. 1261–1264.
14. *Assimonis S. D. et al.* Optimized "better than" raised-cosine pulse for reduced ICI in OFDM systems // 2010 17th International Conference on Telecommunications. IEEE, 2010. P. 249–252.
15. *Ochiai H.* Peak power properties of band-limited signals: with pulse shaping or windowing // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2024. V. 73. № 10. P. 15200–15213.
16. *Aboul-Dahab M. A., Fouad M. M., Roshdy R. A.* Generalized discrete Fourier transform for FBMC peak to average power ratio reduction // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 81730–81740.
17. *Peng S. et al.* PAPR reduction of multicarrier faster-than-Nyquist signals with partial transmit sequence // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 24931–24937.
18. *Sahrab A. A., Yaseen A. D.* Filtered orthogonal frequency division multiplexing for improved 5G systems // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2021. V. 10. № 4. P. 2079–2087.
19. *Zhang X. et al.* Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks // 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2015. P. 1–6.
20. *Луфферчик П. В. и др.* Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23. № 2. С. 177–188.
21. *Калинин В. С., Белов С. П.* Обзор источников помех в спутниковых системах связи // Научный результат. Информационные технологии. 2022. Т. 7. № 3. С. 3–13.
22. *Wenqi Q. et al.* Fine Doppler shift acquisition algorithm for BeiDou software receiver by a look-up table // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2020. V. 31. № 3. P. 612–625.
23. *Tian D. et al.* Frequency offset estimation for 5G based LEO satellite communication systems // 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2019. P. 647–652.
24. *Harris F. J.* On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform // Proceedings of the IEEE. 1978. V. 66. № 1. P. 51–83.
25. *Sultana T., Shawkat S. A.* Employment of pulse shaping techniques for efficient PAPR reduction in OFDM system // 2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). IEEE, 2014. P. 482–487.
26. *Mamun M. M. I., Medhi D., Beard C.* CP-less MIMO discrete Fourier transform spread OFDM // 2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2020. P. 1–6.
27. *Hossain M. N. et al.* Waveform design of DFT-spread WR-OFDM system for the OOB and PAPR reduction // 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, 2018. P. 792–796.
28. *Mamun M. M. I., Beard C., Medhi D.* A UAV-assisted multiuser non-terrestrial cyclic postfixed windowed OFDM system // 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). IEEE, 2022. P. 1–6.
29. 3rd Generation Partnership Project. Technical specification group services and system aspects; general packet radio service (GPRS) enhancements for evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) access. EUTRA Network, 2011.
30. 3GPP Radio Access Network Working Group et al. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15). 3GPP TR 38.901, 2018. V. 15.
31. *Meshkov I. K. et al.* The development of methods for estimating and compensating frequency and time offset in 6G DFT-s-OFDM technology communication systems // 2022 IEEE

International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE, 2022. P. 1040–1045.

32. *Гурлев И. В.* Проблемы развития сетей связи и управления поколения 5G в России // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 5. С. 47.
33. *Baeza V. M. et al.* An overview of channel models for NGSO satellites // 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). IEEE, 2022. P. 1–6.
34. *Tropea M., De Rango F.* A comprehensive review of channel modeling for land mobile satellite communications // Electronics. 2022. V. 11. № 5. P. 820.

Сальников Роман Олегович

аспирант кафедры Телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: kosshak17@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0009-9670-6000.

Мешков Иван Константинович

к.т.н., старший научный сотрудник кафедры Телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: mik.ivan@bk.ru, ORCID ID: 0000-0003-3479-3072.

Гизатулин Азат Ринатович

к.т.н., старший научный сотрудник кафедры Телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: azat_poincare@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0753-0608.

Султанов Альберт Ханович

д.т.н., профессор кафедры прикладной Телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: sultanov.ah@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2830-3498.

Тимофеев Александр Леонидович

к.т.н., доцент кафедры Электронной инженерии, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: a_l_t@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-2137-803X.

Мешкова Алина Газимьяновна

к.т.н., старший научный сотрудник кафедры Телекоммуникационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д.12/6), e-mail: mik.ivan@bk.ru, ORCID ID: 0009-0007-7178-7524.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Development of a method for reducing the PAPR for orthogonal access methods based on the use of shaping filters in hybrid communication networks

Roman O. Salnikov, Ivan K. Meshkov, Azat R. Gizatulin, Albert Kh. Sultanov,
Alexandr L. Timofeev, Alina G. Meshkova

Ufa University of Science and Technology (UUST)

Abstract: This paper presents a method for peak factor (PAPR) reduction in hybrid satellite communication networks using orthogonal access methods and shaping filters. The proposed approach combines flexible protective intervals and formative filtering methods to optimize signal transmission in low-orbit satellite networks. Several types of filters have been investigated, including the raised cosine (RC), the root raised cosine (RRC), the «better than» raised cosine (BTRC) and its optimized version (OBTRC). A new variant of the shaping filter based on OBTRC one is proposed. The method is evaluated by emulation low-orbit satellite communication networks. OFDM and DFT-s-OFDM technologies with zero-tail and unique word modifications. The simulation results show a decrease in PAPR by 0.5-2 dB compared to traditional approaches.

Keywords: OFDM, DFT-s-OFDM, Zero-tail, Unique Word, low-orbit satellites, hybrid telecommunication networks, 5G NR, 6G.

For citation: Salnikov R. O., Meshkov I. K., Gizatulin A. R., Sultanov A. H., Timofeev A. L., Meshkova A. G. Razrabotka metoda snizheniya pik-faktora signala dlya ortogonal'nykh metodov dostupa na osnove ispol'zovaniya formiruyushchih fil'trov v gibridnykh se-tyakh svyazi [Development of a Method for Reducing the PAPR for Orthogonal Access Methods Based on the Use of Shaping Filters in Hybrid Communication Networks] // *Vestnik SibGUTI*. 2026. vol. 20, no. 2. pp. 45–60. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-2-45-60>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Salnikov R. O., Meshkov I. K., Gizatulin A. R.,
Sultanov A. H., Timofeev A. L., Meshkova A.
G., 2026

The article was submitted: 12.03.2026;
revised version: 07.05.2026;
accepted for publication: 08.05.2026.

References

1. Ton W., Zhu P. 6G: The next horizon. 2021.
2. Pekhterev S. V., Makarenko S. I., Koval'skii A. A. Opisatel'naya model' sistemy sputnikovoi svyazi Starlink [Descriptive model of the Starlink satellite communication system]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2022, no. 4, pp. 190–255.
3. An' N. D., Ershov A. V. Sistema «Marafon IoT» i novyi rynek sputnikovogo IoT [Marathon IoT system and the new market of satellite IoT]. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2021, no. S1, pp. 75–80.
4. Ozger M. et al. 6G for connected sky: a vision for integrating terrestrial and non-terrestrial networks. *Proc. of the 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, IEEE, 2023, pp. 711–716.
5. Alfattani S. et al. Multi-mode high altitude platform stations (HAPS) for next generation wireless networks. *arXiv preprint arXiv:2210.11423*, 2022.
6. Sattarzadeh A. et al. Satellite-based non-terrestrial networks in 5G: insights and challenges. *IEEE Access*, 2021, vol. 10, pp. 11274–11283.
7. Cho Y. S. et al. *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
8. Sal'nikov R. O. et al. Analiz metodov snizheniya pik-faktora signala v usloviyakh vliyaniya effekta Doplera v gibridnykh setyakh svyazi [Analysis of methods for reducing signal peak-to-average power ratio under Doppler effect conditions in hybrid communication networks]. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 61–70.
9. Berardinelli G. Generalized DFT-s-OFDM waveforms without cyclic prefix. *IEEE Access*, 2017, vol. 6, pp. 4677–4689.

10. Kumar U. et al. A waveform for 5G: guard interval DFT-s-OFDM. *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
11. Singh R. et al. PAPR reduction for OFDM communication system based on ZCT-pre-coding scheme. *2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, IEEE, 2021, pp. 555–558.
12. Kumar N. et al. Fusion of adaptive SLM technique with companding for PAPR reduction in 5G MIMO-OFDM system. *2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, IEEE, 2023, pp. 1–5.
13. Lee S. J., Beaulieu N. C. Performance comparison of non-data-aided symbol timing-error detection for the raised-cosine and "better than" raised-cosine pulses. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, vol. 57, no. 5, pp. 1261–1264.
14. Assimonis S. D. et al. Optimized "better than" raised-cosine pulse for reduced ICI in OFDM systems. *2010 17th International Conference on Telecommunications*, IEEE, 2010, pp. 249–252.
15. Ochiai H. Peak power properties of band-limited signals: with pulse shaping or windowing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, vol. 73, no. 10, pp. 15200–15213.
16. Aboul-Dahab M. A., Fouad M. M., Roshdy R. A. Generalized discrete Fourier transform for FBMC peak to average power ratio reduction. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 81730–81740.
17. Peng S. et al. PAPR reduction of multicarrier faster-than-Nyquist signals with partial transmit sequence. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 24931–24937.
18. Sahrab A. A., Yaseen A. D. Filtered orthogonal frequency division multiplexing for improved 5G systems. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 2079–2087.
19. Zhang X. et al. Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks. *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
20. Luferschik P. V. et al. Modelirovanie algoritmov umen'sheniya pik-faktora OFDM signalov i realizatsiya nailuchshego metoda dlya kanala s zamiraniyami [Modeling of algorithms for reducing PAPR of OFDM signals and implementation of the best method for a fading channel]. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 177–188.
21. Kalinin V. S., Belov S. P. Obzor istochnikov pomekh v sputnikovykh sistemakh svyazi [Overview of interference sources in satellite communication systems]. *Nauchnyi rezul'tat. Informatsionnye tekhnologii*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 3–13.
22. Wenqi Q. et al. Fine Doppler shift acquisition algorithm for BeiDou software receiver by a look-up table. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 612–625.
23. Tian D. et al. Frequency offset estimation for 5G based LEO satellite communication systems. *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, IEEE, 2019, pp. 647–652.
24. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83.
25. Sultana T., Shawkat S. A. Employment of pulse shaping techniques for efficient PAPR reduction in OFDM system. *2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICIT)*, IEEE, 2014, pp. 482–487.
26. Mamun M. M. I., Medhi D., Beard C. CP-less MIMO discrete Fourier transform spread OFDM. *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, IEEE, 2020, pp. 1–6.
27. Hossain M. N. et al. Waveform design of DFT-spread WR-OFDM system for the OOB and PAPR reduction. *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, IEEE, 2018, pp. 792–796.
28. Mamun M. M. I., Beard C., Medhi D. A UAV-assisted multiuser non-terrestrial cyclic postfixed windowed OFDM system. *2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.
29. 3rd Generation Partnership Project. Technical specification group services and system aspects; general packet radio service (GPRS) enhancements for evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) access. *EUTRA Network*, 2011.
30. 3GPP Radio Access Network Working Group et al. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15). *3GPP TR 38.901*, 2018, vol. 15.
31. Meshkov I. K. et al. The development of methods for estimating and compensating frequency and time offset in 6G DFT-s-OFDM technology communication systems. *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, IEEE, 2022, pp. 1040–1045.

32. Gurlev I. V. Problemy razvitiya setei svyazi i upravleniya pokoleniya 5G v Rossii [Problems of development of 5G communication and management networks in Russia]. *Vestnik evraziiskoi nauki*, 2019, vol. 11, no. 5, p. 47.
33. Baeza V. M. et al. An overview of channel models for NGSO satellites. *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.
34. Tropea M., De Rango F. A comprehensive review of channel modeling for land mobile satellite communications. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 5, p. 820.

Roman O. Salnikov

PhD student, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: kosshak17@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0009-9670-6000.

Ivan K. Meshkov

Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: mik.ivan@bk.ru, ORCID ID: 0000-0003-3479-3072.

Azat R. Gizatulin

Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: azat_poincare@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0753-0608.

Albert Kh. Sultanov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: sultanov.ah@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2830-3498.

Alexander L. Timofeev

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Electronic Engineering, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: a_l_t@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0003-2137-803X.

Alina G. Meshkova

Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Department of Telecommunication Systems, Ufa University of Science and Technology (UUST, Russia, 450008, Ufa, Karla Marksa St. 12/6), e-mail: mik.ivan@bk.ru, ORCID ID: 0009-0007-7178-7524.