

## Повышение эффективности гидроакустической связи в мелком море за счет применения алгоритмов временной синхронизации

Р. С. Кириленко

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

[rkirilenko@sfedu.ru](mailto:rkirilenko@sfedu.ru)

**Аннотация.** Цель исследований, отраженная в статье, – повысить эффективность гидроакустической системы связи в мелком море на основе адаптации технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM-технологии).

Определена математическая модель, наиболее корректно описывающая гидроакустический канал мелкого моря. Проведено моделирование мелководного канала с учетом его нестационарности. В качестве базового метода синхронизации рассмотрен алгоритм Парка, который используется для определения начала OFDM-символа.

Предложена модификация данного алгоритма синхронизации, направленная на повышение устойчивости к ложным срабатываниям и искажениям, вызванным сложной интерференционной картиной, характерной для шельфовой зоны. Разработан усовершенствованный алгоритм синхронизации на основе метода Парка, адаптированный к гидроакустическому каналу мелкого моря.

Моделирование подтвердило, что предложенная модификация позволяет точнее определять границы информационных OFDM-символов в условиях многолучевости и доплеровского рассеяния по сравнению с классическим подходом, снижая вероятность межсимвольной интерференции. Адаптация OFDM-технологии к гидроакустическим каналам мелкого моря за счет усовершенствования алгоритма Парка обеспечивает более надежную синхронизацию и, как следствие, повышает достоверность передачи данных в сложных условиях шельфа.

**Ключевые слова:** гидроакустический канал, связь, мелкое море, синхронизация сигнала, мультиплексирование,  $t$ -распределение

**Для цитирования:** Кириленко Р. С. Повышение эффективности гидроакустической связи в мелком море за счет применения алгоритмов временной синхронизации // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 4. С. 41–49. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-41-49.

Original article

## Improving the Efficiency of Sonar Communication in Shallow Seas Through the Use of Time Synchronization Algorithms

R. S. Kirilenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

[rkirilenko@sfedu.ru](mailto:rkirilenko@sfedu.ru)

**Abstract.** The purpose of the work is to increase efficiency of a shallow-water hydroacoustic communication system by adapting orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology.

A mathematical model that most accurately describes the shallow-water hydroacoustic channel was defined. The shallow-water channel was simulated, taking into account its non-stationarity. Park's algorithm, which is used to determine the beginning of an OFDM symbol, was considered as the basic synchronization method.

A modification of this synchronization algorithm is proposed, aimed at increasing the robustness to false alarms and distortions caused by the complex interference pattern characteristic of the shelf zone. An improved synchronization algorithm based on Park's method, adapted to the shallow-water hydroacoustic channel, was developed.

Simulation confirmed that the proposed modification allows for more accurate determination of OFDM information symbol boundaries in multipath and Doppler scattering conditions compared to the classical approach, reducing the likelihood of intersymbol interference. Adapting OFDM technology to shallow-water hydroacoustic channels through an improved Park algorithm ensures more reliable synchronization and, consequently, increases the reliability of data transmission in challenging offshore conditions.

**Keywords:** sonar channel, communication, shallow sea, signal synchronization, multiplexing,  $t$ -distribution

**For citation:** Kirilenko R. S. Improving the Efficiency of Sonar Communication in Shallow Seas Through the Use of Time Synchronization Algorithms // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 4. P. 41–49. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-41-49.

**Введение.** Не существует типичного подводного канала. Каждая конкретная среда обладает различными характеристиками, которые влияют на потенциальную производительность цифровых систем связи. Гидроакустический канал (ГАК) мелкого моря – это один из самых сложных акустических каналов. Адаптация современных методов передачи данных к ультразвуковой подводной связи требует предположения о гибкой модели канала, которая учитывает разнообразие явлений, происходящих в нем [1]. Исследования показывают, что в ГАК мелкого моря преобладают негауссовские шумовые характеристики. Реальная шумовая среда под водой имеет тенденцию к интенсивному и импульсивному поведению, что больше соответствует шумам с  $t$ -образным распределением [2].

Основное воздействие на сигнал оказывает сильная многолучевость. Сигнал достигает приемника по множеству путей: прямой луч, лучи, отраженные от поверхности моря, дна, подводных объектов и неоднородностей водной толщ. Многолучевость вызывает межсимвольную интерференцию (ISI). Мультиплексирование с ортогональными частотными поднесущими (OFDM) изначально устойчиво к ISI при правильной длине циклического префикса (CP). В мелком море задержки между лучами могут быть очень велики (десятки и даже сотни миллисекунд). Это требует использования очень длинного CP, что снижает эффективную скорость передачи данных (так как CP – это служебные, бесполезные данные).

Из-за интерференции множества лучей на некоторых частотах сигналы усиливаются (конструктивная интерференция), а на других – ослабляются или полностью гасятся (деструктивная интерференция). В мелком море этот эффект выражен особенно сильно [3]. OFDM как раз делит спектр на множество узких поднесущих. Некоторые из этих поднесущих могут оказаться в «провалах» амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) канала. Это приводит к высокому уров-

ню битовых ошибок (BER) на этих конкретных поднесущих, даже если общее отношение сигнал/шум (SNR) приемлемо.

Нестационарность ГАК (движение передатчика/приемника, волнение морской поверхности, изменения термоклина, прохождения судов) приводит к доплеровскому расширению спектра и быстрым изменениям амплитуды и фазы сигнала [4]. Для OFDM, который критичен к ортогональности поднесущих, доплеровское смещение даже на доли процента от межподнесущего интервала разрушает эту ортогональность, вызывая межканальную интерференцию (ICI).

Обеспечение высокоскоростной подводной акустической связи в режиме реального времени остается критической дилеммой в области обработки гидроакустических сигналов [5]. Одним из способов повышения эффективности гидроакустической системы передачи информации служит точная синхронизация сигнала.

Классический и эффективный метод синхронизации OFDM-сигналов – алгоритм Park [6]. Он осуществляет «грубую» синхронизацию в OFDM-системах по времени и доказал свою эффективность в радиосвязи, однако в условиях мелководного ГАК сталкивается с трудностями.

В ГАК SNR часто бывает очень низким из-за затухания сигнала и высокого уровня природных (волнение, биологические источники) и антропогенных шумов. Метод Park основан на корреляции принятого сигнала с известной преамбулой. При низком SNR корреляционный пик, указывающий на начало OFDM-символа, становится слабым и зашумленным. Это приводит к высокой вероятности ложного срабатывания или пропуска синхронизации.

Сильный и протяженный во времени многолучевой ГАК «размазывает» корреляционный пик. Вместо одного четкого пика алгоритм Park может увидеть несколько пиков или один широкий пик, что не позволит точно определить момент начала символа. Ошибка синхронизации во времени при-

водит к повороту всех поднесущих в фазовом пространстве (появляется линейный фазовый набег по частоте) и частичной потере ортогональности.

Доплеровское смещение изменяет частоту принимаемого сигнала. Алгоритм Park использует повторяющуюся структуру преамбулы для оценки смещения. Однако в условиях мелководного ГАК доплеровское смещение может меняться на протяжении одного пакета, что делает начальную оценку неточной. Это напрямую влияет на качество последующей частотной синхронизации.

**Постановка задачи.** Повысить эффективность гидроакустической системы связи в мелком море на основе адаптации алгоритмов временной синхронизации OFDM-технологии. Провести моделирование разрабатываемых алгоритмов в условиях мелководного канала.

**Модель шума мелководного ГАК.** Точное моделирование ГАК уже давно стало одной из основных задач, которые необходимо решить в области обработки подводных акустических сигналов. ГАК изменчив во времени, демонстрирует выраженные эффекты многолучевости и значительные задержки, при этом условия в канале значительно различаются в разных местах. Тем не менее, в течение времени когерентности разумно предположить, что передаточная функция канала ГАК останется постоянной. Принятый сигнал  $y(t)$  может быть выражен как функция переданного сигнала  $x(t)$ , когда он проходит через канал рассеяния:

$$y(t) = \int h(t, \tau)x(t - \tau)dt + N(t) = \iint H(v, \tau)x(t - \tau)e^{j2\pi vt} dvdt + N(t),$$

где  $h$  представляет изменяющуюся во времени функцию импульсной характеристики канала;  $H$  обозначает преобразование Фурье  $h$  по времени;  $\tau$  – временная задержка;  $v$  – доплеровский сдвиг частоты;  $N(t)$  означает  $t$ -распределенный шум с дисперсией  $\sigma^2$  для случайной величины  $X$ . С помощью выборки временной области и предположения, что в пределах кадра данных диапазона  $N$  компоненты многолучевого распространения  $L$  остаются относительно стабильными, дискретная модель принимаемого сигнала во временной области может быть выражена следующим образом:

$$y(k) = \sum_{l=0}^L h(k, l)x(k - \tau) + N(t).$$

При моделировании гидроакустического шума на мелководье наиболее предпочтительно использовать  $t$ -распределение. В отличие от гаус-

совского шума, который возникает при большом числе независимых рассеивателей,  $t$ -распределение описывает воздействие небольшого количества рассеивателей (десятки–сотни) или коррелированность их вкладов. Визуально на гистограмме  $t$ -распределения (рис. 2) можно увидеть так называемые тяжелые хвосты, т. е. медленное убывание амплитуды при удалении от центра распределения по сравнению с нормальным распределением Гаусса. Т. е., даже на больших расстояниях от среднего значения еще заметны некоторые наблюдения (выбросы).

Функция плотности вероятности (ФПВ)  $t$ -распределения может быть выражена следующим образом [7]:

$$P_T(t, d) = \frac{\Gamma\left(\frac{d+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi d} \Gamma\left(\frac{d}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{d}\right)^{-(d+1)/2}, \quad (1)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  представляет собой гамма-функцию, в то время как  $d$  обозначает степени свободы, связанные с  $t$ -распределением. Значение  $d$  оказывает значительное влияние на форму ФПВ. Уменьшение значения  $d$  приводит к тому, что хвосты распределения становятся тяжелее; и наоборот, увеличение  $d$  приводит к сужению хвостов. При достаточно больших степенях свободы ФПВ  $t$ -распределения сходится к гауссову распределению.  $P_T(t, d)$  обозначает вероятность наблюдения определенного значения  $t$ -распределения с  $d$  степенями свободы. Значение ФПВ, выраженное в уравнении (1), имеет среднее значение, равное нулю, когда  $d > 2$ , а его дисперсия определяется как  $d/(d-2)$ . Чтобы создать модель для случайной величины  $X$  с дисперсией  $\sigma^2$ , переменная может быть преобразована следующим образом [8]:

$$t = \sqrt{\frac{d}{(d-2)\sigma^2}} X.$$

Таким образом, новая масштабируемая функция ФПВ может быть выражена следующим образом

$$P_T(x, d) = \frac{\Gamma\left(\frac{d+1}{2}\right)}{\sqrt{(d-2)\pi} \Gamma\left(\frac{d}{2}\right) \sigma} \left[1 + \frac{x^2}{(d-2)\sigma^2}\right]^{-(d+1)/2}. \quad (2)$$

Выбор параметра  $d$  для  $t$ -распределения основан на комплексном анализе теоретических и экспериментальных работ по статистике ревербера-

ции в мелководных условиях. Фундаментальные и обзорные работы по мелководной реверберации [9] подтверждают сложность статистического описания таких сигналов. Количественная оценка характерных условий среды была выполнена на базе крупномасштабных натуральных измерений в Балтийском море, где глубины варьировались от 12 до 89 м, а типы дна включали песок или гравий [10]. Эти условия репрезентативны для мелководья и соответствуют режиму, в котором эффективное число доминирующих рассеивателей (неровности дна, неоднородности) приводит к появлению распределений с тяжелыми хвостами. Принятое здесь значение  $d = 4.5$  находится в диапазоне, соответствующем умеренному проявлению негауссовости, и обеспечивает устойчивость используемых алгоритмов синхронизации. Подставив принятое значение  $d$  в (2), получим:

$$P_T(x, d^*) = \frac{42.3423}{\sigma} \left( 5 + \frac{2x^2}{\sigma^2} \right)^{-2.75}. \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) описывает ФПВ  $t$ -распределения для мелководного гидроакустического канала.

**Описание алгоритмов синхронизации.** Для реализации синхронизации во времени был применен алгоритм Park, в связи с тем, что, сводя к минимуму помехи между поднесущими, этот алгоритм эффективно устраняет межсимвольные помехи и помехи между несущими, вызванные временными отклонениями. Алгоритм Park [10] отличается от других алгоритмов синхронизации тем, что вводит новые коды преамбулы и методы корреляции для получения временных показателей в форме импульсов. Последовательность  $PN$  кода преамбулы задается следующим выражением:

$$P_{\text{pro}} = [C_{N/4} D_{N/4} C_{*N/4} D_{*N/4}],$$

где  $C_{N/4}$  – выборки длиной  $N/4$ , сгенерированные выполнением обратного дискретного преобразования Фурье (IFFT) для последовательности  $PN$ ;  $C_{*N/4}$  – сопряжение  $C_{N/4}$ . Чтобы получить временную метрику в форме импульса,  $D_{N/4}$  спроектирован таким образом, чтобы быть симметричным  $C_{N/4}$ . Чтобы использовать симметрию  $D_{N/4}$  относительно  $C_{N/4}$  и максимизировать разницу между двумя соседними значениями временной метрики, алгоритм Park вводит новую временную метрику, выраженную следующим образом:

$$M_p(d) = \frac{|P(d)|^2}{(R(d))^2}, \quad (4)$$

где

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N/2} y(d-k)y(d+k); \quad (5)$$

$$R(d) = \sum_{k=0}^{N/2} |y(d+k)|^2. \quad (6)$$

Однако когда модель шума изменяется с гауссовского распределения на  $t$ -образное, применение квадратичной нормализации оказывает негативное влияние на производительность синхронизации. Неравномерный характер  $t$ -распределения приводит к появлению шумовых точек с более высокой амплитудой, а операция возведения в квадрат в дальнейшем усиливает этот шум, тем самым нарушая точность временной синхронизации. Формулы (4)–(6) были скорректированы для повышения надежности и точности временной синхронизации в условиях  $t$ -распределенного шума.

Точная формулировка выглядит следующим образом:

$$M_{\text{pro}}(d) = \frac{|P(d)|^2}{R(d)}, \quad (7)$$

где

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N/2} y(d-k)y(d+k) + y(d+k-N/2)y(d+k); \quad (8)$$

$$R(d) = \sum_{k=0}^{N/2} |y(d+k) + y(d-k)|^2. \quad (9)$$

**Моделирование.** Моделирование и анализ работы OFDM-системы связи в условиях гидроакустического канала мелкого моря с учетом многолучевого распространения, доплеровских искажений и негауссовского шума с  $t$ -распределением было выполнено в MatLab R2024a.

Основные параметры OFDM-системы: отношение сигнал-шум 10 дБ, доплеровский масштаб 1.001, степень свободы  $t$ -распределения шума  $d = 4.5$ . Профиль задержек канала включает прямой путь и три эхо-сигнала с задержками 20, 50 и 100 мс соответственно. Профиль  $t$ -шума представлен на рис. 1.

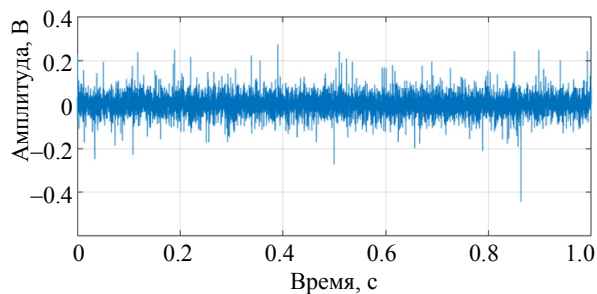


Рис. 1. Профиль  $t$ -шума  
 Fig. 1.  $T$ -noise profile

Система реализует полную цепочку обработки сигнала: генерация тестовых данных, OFDM-модуляция с параметрами FFT – размер 256; длина циклического префикса – 128 отсчетов (12.8 мс); модуляция QPSK; передача через канал с многолучевостью и  $t$ -распределенным шумом; временная синхронизация алгоритмом Park; OFDM-демодуляция. На рис. 2 изображены гистограммы гауссовского и  $t$ -шума одинаковой мощности. Графики показывают, какое количество измеренных значений шума попало в определенный диапазон амплитуд. На рис. 2 хорошо видны так называемые тяжелые хвосты (медленное убывание амплитуды при удалении от центра распределения)  $t$ -шума.

К разработанной OFDM-системе были добавлены алгоритм синхронизации Park, описанный формулами (4)–(6), и усовершенствованный алгоритм Park, описанный формулами (7)–(9). Моделирование проводилось со следующими данными: длина преамбулы Park – 128 отсчетов (12.8 мс), а также для наглядности был добавлен нулевой интервал длиной 150 отсчетов (15 мс).

Сравнение переданного и принятого сигналов во временной области показано на рис. 3. Оно наглядно демонстрирует эффекты, вносимые гидроакустическим каналом: задержки, обусловленные многолучевостью, общее затухание амплитуды из-за потерь при распространении, появление задержанных эхо-копий сигнала, вызывающих межсимвольную интерференцию и размытие границ символов, доплеровские деформации временной шкалы (сжатие–растяжение), приводящие к потере ортогональности поднесущих, импульсный характер  $t$ -шума – наличие редких мощных выбросов, превышающих средний уровень сигнала, нарушение структуры циклического префикса и не стационарность сигнала. Все эти факторы существенно усложняют синхронизацию и оценку канала.

На рис. 3, *a* можно видеть добавленную преамбулу Park с амплитудой от 1 до –1 длиной 12.8 мс перед сигналом.

Сравнение спектров переданного сигнала и сигнала, прошедшего через канал с  $t$ -шумом, представленное на рис. 4, показывает, что канал вносит существенные искажения. Наблюдается частотно-зависимое затухание, приводящее к спаду мощности на более высоких поднесущих частотах. Воздействие  $t$ -шума проявляется в повышении уровня спектральной плотности помех в полосе сигнала, что увеличивает риск импульсных ошибок. Нарушение прямоугольной формы спектра и появление межканальной интерференции (ICI) свидетельствует о наличии доплеровских эффектов. Характерные провалы в полосе сигнала подтверждают наличие частотно-селективных замираний, вызванных многолучевостью.

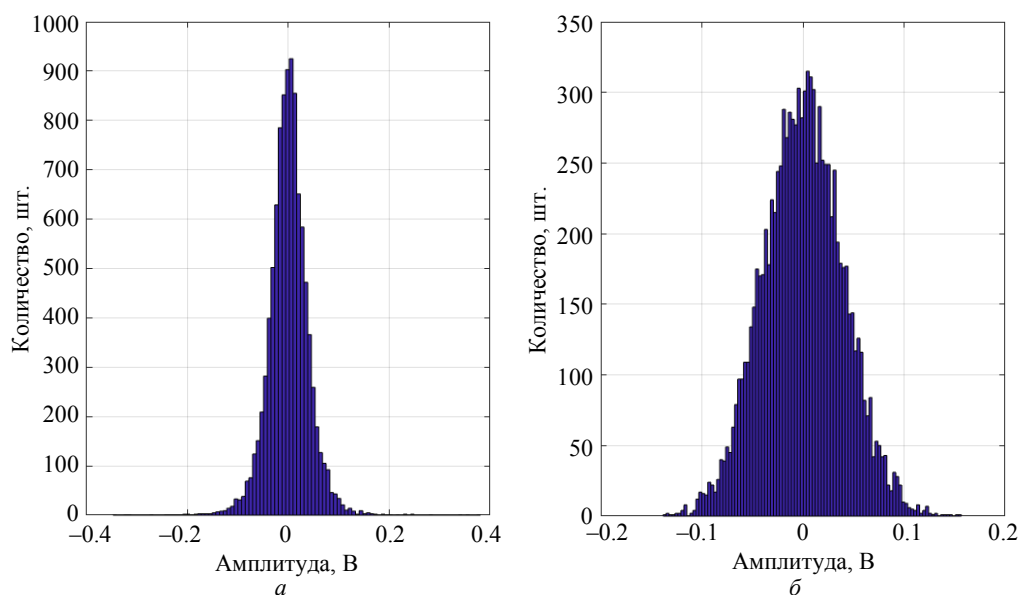


Рис. 2. Сравнение гистограмм  $t$ -шума (*a*) и гауссова шума (*b*)  
 Fig. 2. Comparison of histograms of  $t$ -noise (*a*) and Gaussian noise (*b*)

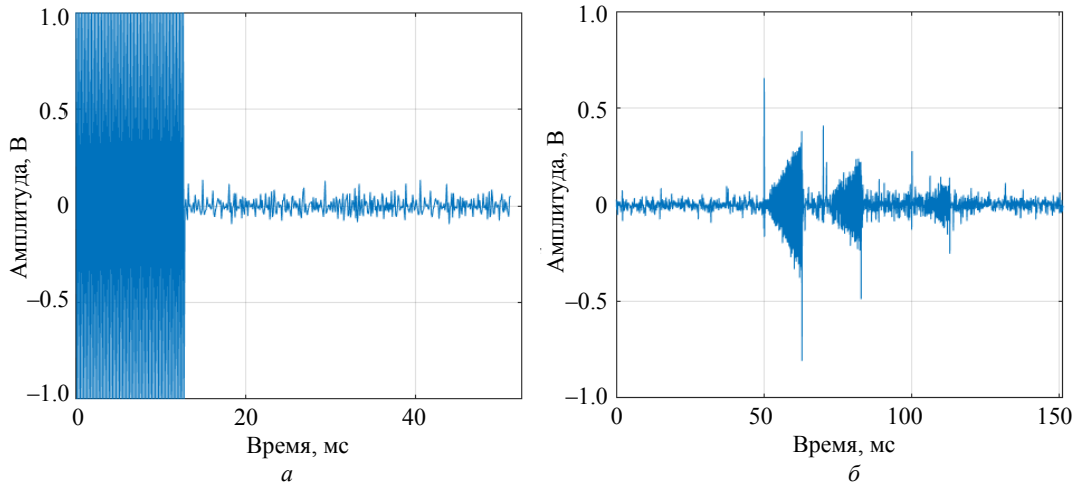


Рис. 3. Сравнение переданного (а) и принятого (б) сигналов  
Fig. 3. Comparison of transmitted (a) and received (b) signals

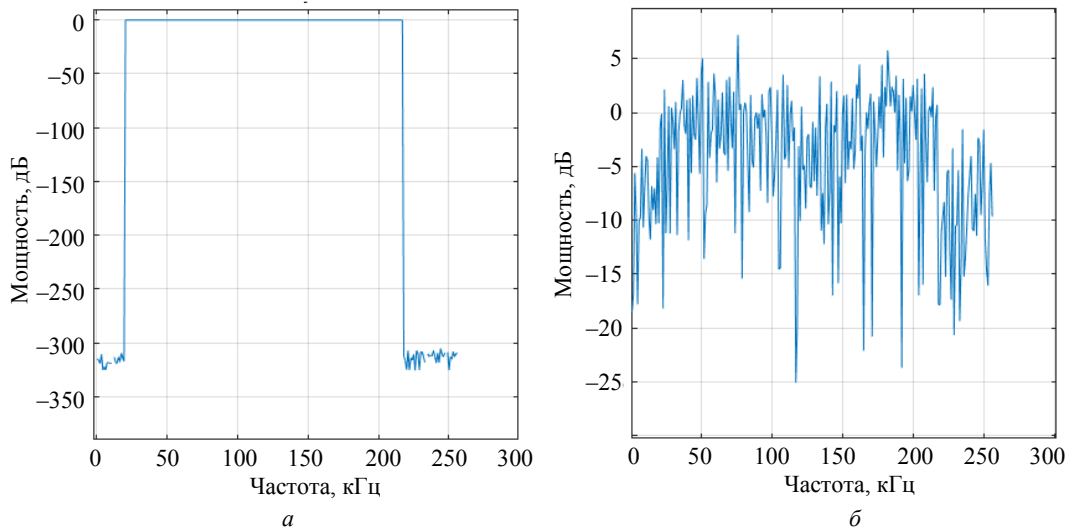
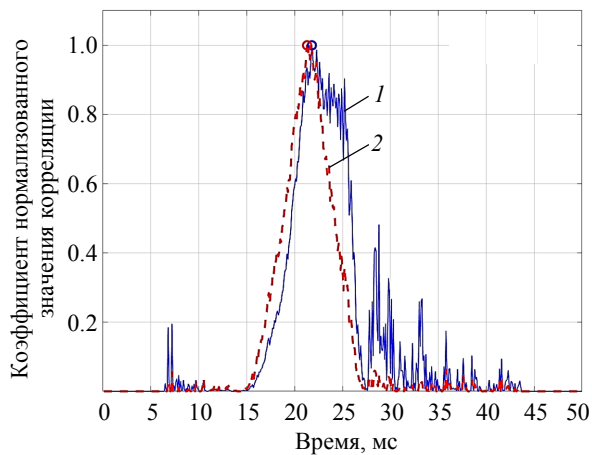


Рис. 4. Спектры переданного OFMD сигнала (а) и принятого (б)  
Fig. 4. Spectra of transmitted OFMD signal (a) and received (b)

На рис. 5 представлен результат расчета пиков корреляции для алгоритмов Park.



1 – Park; 2 – улучшенный Park  
Рис. 5. Обнаружение пика корреляции при  $d = 4.5$  и  $SNR = 8$   
Fig. 5. Detection of the correlation peak at  $d = 4.5$  and  $SNR = 8$

Для оценки правильности обнаружения и синхронизации используем ключевую метрику в обработке сигналов – нормализованное значение пика корреляции, которая показывает степень линейного сходства между двумя сигналами в их наилучшем временном совпадении. Коэффициент нормализованного значения пика корреляции является безразмерной величиной и принимает значение от  $-1$  до  $1$ . Положение пика по оси времени показывает временную задержку между сигналами, а значение пика подтверждает, что это действительно совпадение, а не случайная флуктуация. Как видно из рис. 5, пик корреляции стандартного алгоритма Park достигается на  $21.8$  мс, следовательно, ошибка синхронизации составляет  $0.4$  мс ( $1.9\%$ ). Пик корреляции улучшенного алгоритма синхронизации Park достигнут на  $21.3$  мс, т. е. ошибка синхронизации составила  $1$  отсчет ( $0.5\%$ ).

Для подтверждения эффективности работы улучшенного алгоритма синхронизации был проведен расчет количества ошибок в зависимости от отношения сигнал-шум (от 0 до 9 дБ), который показан на рис. 6.

Рассчитанное среднее количество ошибок стандартного алгоритма синхронизации Park составило 10.1, а разработанного улучшенного алгоритма синхронизации Park – 0.5.

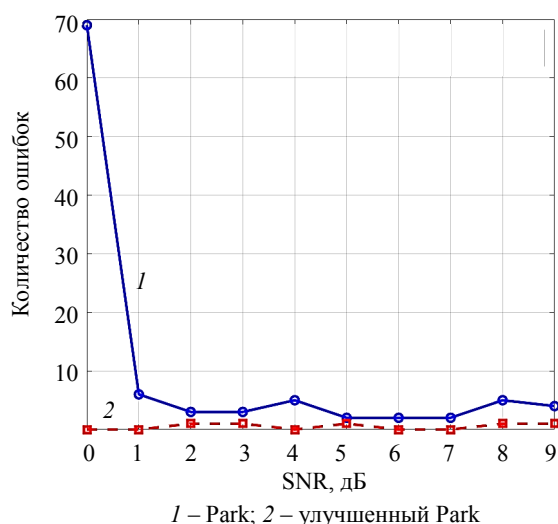


Рис. 6. Расчет ошибок алгоритмов синхронизации  
Fig. 6. Calculation of errors of synchronization algorithms

**Заключение.** В ходе проведенного исследования была успешно решена задача повышения эффективности синхронизации OFDM-сигналов в условиях сложного гидроакустического канала мелкого моря на основе модификации классического алгоритма Парка. За счет оптимизации формулы вычисления метрики, в частности модификации энергетического нормирующего члена  $R(d)$ , удалось получить более выраженный и острый пик корреляции по сравнению с платообразной характеристикой классического метода Парка. Проведенное моделирование подтвердило, что модернизированный алгоритм обеспечивает снижение вероятности ошибок синхронизации, вызванных ложным обнаружением начала символа.

Повысилась точность определения временного смещения, что напрямую привело к уменьшению межсимвольной интерференции после операции быстрого преобразования Фурье в приемнике. Снижен BER в целом для системы связи. Улучшенная синхронизация создала более надежную основу для последующих этапов обработки сигнала (оценка и коррекция частотного сдвига, эквалайзация), что в итоге улучшило достоверность приема данных.

В отличие от многих исследований, фокусирующихся на улучшении синхронизации за счет введения сложных пилот-символов или преамбул (что снижает пропускную способность), данный подход сохраняет прозрачность для полезных данных, работая исключительно со структурой циклического префикса. В этом состоит его ключевое преимущество перед методами, требующими выделенных обучающих последовательностей. По сравнению с другими модификациями алгоритма Парка предложенный комплекс мер оказался более сбалансированным и эффективным именно для специфики мелководного гидроакустического канала.

Дальнейшее комбинирование модернизированного алгоритма Парка с методами тонкой синхронизации на основе пилот-несущих для создания двухэтапной схемы может обеспечить максимальную точность в зависимости от текущих оценок параметров канала (коэффициента многолучевости, отношения сигнал/шум). Создание совместного метода, который на основе той же корреляционной функции будет не только оценивать временное, но и эффективно компенсировать частотное смещение, вызванное движением носителей в мелком море. Таким образом, представленная модернизация алгоритма Парка – это эффективное и практично реализуемое решение для повышения надежности начального этапа синхронизации в гидроакустических системах OFDM-связи, что вносит вклад в развитие устойчивых подводных телекоммуникационных технологий.

#### Список литературы

1. Кириленко Р. С. Применение OFDM сигналов для формирования гидроакустической связи // Сб. тр. IX Всерос. конф. мол. уч. и спец. «Акустика среды обитания». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. С. 196–200.
2. Filtered-OFDM with channel coding based on T-Distribution noise for underwater acoustic communication / M. S. Ahmed, N. S. M. Shah, F. Ghawbar,

Y. A. Jawhar, A. A. Almohammed // J. Ambient Intell. Humaniz. Comput. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 3379–3392. doi: 10.1007/s12652-020-01713-9.

3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization // IEEE Commun. Magazine.

2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89. doi: 10.1109/MCOM.2009.4752682.

4. Кириленко Р. С. OFDM модулирование несущей частоты параметрической гидроакустической излучающей антенны // Сб. ст. по материалам LVIII междунар. науч.-практ. конф. «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований». Новосибирск: СибАК, 2022. Т. 12(49). С. 94–99.

5. Underwater acoustic communications based on OCDM for Internet of underwater things / B. Wang, Y. Wang, Y. Li, X. Guan // IEEE Internet Things J. 2023. Vol. 10, no. 24. P. 22128–22142. doi: 10.1109/JIOT.2023.3304488.

6. A novel timing estimation method for OFDM systems / B. Park, H. Cheon, Ch. Kang, D. Hong // IEEE Commun. Lett. 2003. Vol. 7, no. 5. P. 239–241. doi: 10.1109/LCOMM.2003.812181.

7. Lange K. L., Little R. J. A., Taylor J. M. G. Robust statistical modeling using the T-Distribution // J. of the Am. Statistical Association. 1987. Vol. 84, no. 408. P. 881–896. doi: 10.1080/01621459.1989.10478852.

8. Underwater acoustic noise model for shallow water communications / J. S. Panaro, F. R. Lopes, L. M. Barreira, F. E. Souza // Proc. of Brazilian Telecommunications Symp. (SBRT'12). Brazil, 2012. Vol. 6. P. 1–4. doi: 10.14209/sbrt.2012.85.

9. Abraham D. A., Lyons A. P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar beamwidth and bandwidth. In book: Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance / N. G. Pace, F. B. Jensen. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 539–546. doi: 10.1007/978-94-010-0626-2\_67.

10. Spatial and temporal variability of ambient underwater sound in the Baltic sea / M. Mustonen, A. Klauson, M. Andersson, D. Clorennec, T. Folegot, R. Koza, Ju. Pajala, L. Persson, J. Tegowski, J. Tougaard, M. Wahlberg, P. Sigray // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, no. 1. Art. 13237. doi: 10.1038/s41598-019-48891-x.

#### Информация об авторе

**Кириленко Роман Сергеевич** – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники (ЭГАиМТ), Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, ул. Шевченко, 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия.  
E-mail: rkirilenko@sfedu.ru

#### References

1. Kirilenko R. S. Primenenie OFMD signalov dlja formirovaniya gidroakusticheskoy svyazi // Sb. tr. IX Vseoros. konf. mol. uch. i spec. «Akustika sredey obitaniya». M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2024. S. 196–200. (In Russ.).

2. Filtered-OFDM with channel coding based on T-Distribution noise for underwater acoustic communication / M. S. Ahmed, N. S. M. Shah, F. Ghawbar, Y. A. Jawhar, A. A. Almohammed / J. Ambient Intell. Humaniz. Comput. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 3379–3392. doi: 10.1007/s12652-020-01713-9.

3. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical Characterization // IEEE Commun. Magazine. 2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89. doi: 10.1109/MCOM.2009.4752682.

4. Kirilenko R. S. OFDM modulirovanie nesushhej chastoty parametriceskoj gidroakusticheskoy izluchajushhej anteny // Sb. st. po mat. LVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Voprosy texnicheskix i fiziko-matematicheskix nauk v svete sovremennyh issledovanij». Novosibirsk: SibAK, 2022. Т. 12(49). С. 94–99. (In Russ.).

5. Underwater acoustic communications based on OCDM for Internet of underwater things / B. Wang, Y. Wang, Y. Li, X. Guan // IEEE Internet Things J. 2023. Vol. 10, no. 24. P. 22128–22142. doi: 10.1109/JIOT.2023.3304488.

6. A novel timing estimation method for OFDM systems / B. Park, H. Cheon, Ch. Kang, D. Hong // IEEE Commun. Lett. 2003. Vol. 7, no. 5. P. 239–241. doi: 10.1109/LCOMM.2003.812181.

7. Lange K. L., Little R. J. A., Taylor J. M. G. Robust Statistical Modeling Using the t Distribution // J. of the Am. Statistical Association. 1987. Vol. 84, no. 408. P. 881–896. doi: 10.1080/01621459.1989.10478852.

8. Underwater acoustic noise model for shallow water communications / J. S. Panaro, F. R. Lopes, L. M. Barreira, F. E. Souza // Proc. of Brazilian Telecommunications Symp. (SBRT'12). Brazil, 2012. Vol. 6. P. 1–4. doi: 10.14209/sbrt.2012.85.

9. Abraham D. A., Lyons A. P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar beamwidth and bandwidth. In book: Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance / N. G. Pace, F. B. Jensen. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 539–546. doi: 10.1007/978-94-010-0626-2\_67.

10. Spatial and temporal variability of ambient underwater sound in the Baltic sea / M. Mustonen, A. Klauson, M. Andersson, D. Clorennec, T. Folegot, R. Koza, Ju. Pajala, L. Persson, J. Tegowski, J. Tougaard, M. Wahlberg, P. Sigray // Scientific Reports. 2019. Vol. 9, no. 1. Art. 13237. doi: 10.1038/s41598-019-48891-x.

Information about the author

**Roman S. Kirilenko** – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Engineering, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrument Engineering, Southern Federal University, Shevchenko St., 2, build. E, Taganrog, 347922, Russia.

E-mail: rkirilenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; принята к публикации после рецензирования 06.03.2026; опубликована онлайн 27.04.2026.

Submitted 22.01.2026; accepted 06.03.2026; published online 27.04.2026.

---