

## Обзор методов модуляции и применяемых сигналов в гидроакустической связи

**Х. К. Альсаид**

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

haider.physics@bk.ru

**Аннотация.** Разработчики подводных акустических систем связи (ПАК) сталкиваются с проблемой, обусловленной широким диапазоном характеристик связи в подводных акустических каналах, особенно высокой изменчивостью мгновенных условий на мелководье. В статье представлен систематический обзор современных методов модуляции и типов сигналов, применяемых в системах гидроакустической связи. Рассмотрены основные проблемы передачи данных в подводном акустическом канале, включая многолучевое распространение, доплеровский сдвиг частоты и частотно-избирательные замирания. Проанализированы методы расширения спектра, включая прямую последовательность, скачкообразную перестройку частоты и линейную частотную модуляцию. Представлены характеристики современных коммерческих гидроакустических модемов и направления развития технологий подводной беспроводной связи.

**Ключевые слова:** гидроакустическая связь, методы модуляции, расширение спектра, подводный акустический канал, многолучевое распространение

**Для цитирования:** Альсаид Х. К. Обзор методов модуляции и применяемых сигналов в гидроакустической связи // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 4. С. 24–40. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-24-40.

Review article

## Review of Modulation Methods and Signals Used in Hydroacoustic Communication

**H. K. Alsaeed**

Southern Federal University, Taganrog, Russia

haider.physics@bk.ru

**Abstract.** The designers of underwater acoustic communication (UAC) systems face a challenge due to the wide range of communication characteristics of underwater acoustic channels, particularly the highly variable instantaneous conditions in shallow waters. This article presents a systematic review of modern modulation methods and signal types used in underwater acoustic communication systems. It examines the key challenges of data transmission in underwater acoustic channels, including multipath propagation, Doppler frequency shift, and frequency-selective fading. Spread spectrum techniques, including direct sequence, frequency hopping, and frequency modulation, are analyzed. The characteristics of modern commercial underwater acoustic modems and future developments in underwater wireless communication technologies are presented.

**Keywords:** hydroacoustic communication, modulation methods, spread spectrum, underwater acoustic channel, multipath propagation

**For citation:** Alsaeed H. K. Review of Modulation Methods and Signals Used in Hydroacoustic Communication // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 4. P. 24–40. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-4-24-40.

**Введение.** Возрастающий интерес к исследованиям Мирового океана с применением необитаемых подводных аппаратов определяет необходимость развития систем подводной акустической связи. Разработка и эксплуатация надежных систем гидроакустической связи для мелководных морей остается актуальной научной и инженерной проблемой из-за неблагоприятных условий распространения акустических волн в подводном канале [1].

Современные системы подводной связи не обеспечивают безошибочной передачи данных с использованием унифицированных сигналов и алгоритмов как в горизонтальном, так и в вертикальном каналах распространения. Достижимые скорости передачи данных существенно ниже, чем в наземных радиосистемах, а вероятность ошибочного приема возрастает из-за непредсказуемых изменений параметров канала распространения.

**Специфика подводного акустического канала.** Передаваемый сигнал в мелководном канале претерпевает многократные отражения от граничных поверхностей (дно, поверхность воды) и подводных объектов. Приемное устройство регистрирует как сигнал прямого распространения, так и переотраженные компоненты. Рефракция акустических волн обусловлена изменением скорости звука с глубиной и приводит к искажению фронта волны.

Многолучевое распространение и рефракция вызывают временную дисперсию передаваемого сигнала. Доплеровский эффект, обусловленный относительным перемещением передатчика и приемника, приводит к масштабированию широкополосного сигнала во временной области. Данный эффект существенно влияет на эффективность системы связи.

Указанные неблагоприятные факторы присутствуют и в других системах беспроводной связи, однако в водной среде при использовании акустических волн их влияние значительно усиливается. Пропускная способность гидроакустического канала непосредственно ограничивается доступной полосой частот и низкой скоростью распространения акустических волн (около 1500 м/с) в сравнении с радиолокацией, равной скорости света [1].

Дополнительную проблему точного определения характеристик подводных каналов связи представляет сезонная изменчивость условий функционирования, обусловленная вариациями температуры, солености и гидрологических условий [2].

Физический уровень системы, обеспечивающий эффективную и надежную акустическую линию связи, – это основа любой функционирующей подводной сети передачи данных. Даже при способности системы функционировать в режиме высокоскоростной передачи, для инициализации и восстановления соединения используется надежный низкоскоростной режим. Система переключается в режим с низкой скоростью передачи при ухудшении условий распространения или увеличении уровня акустических шумов.

Критически важные подводные системы, требующие экстренной связи, также используют надежный канал передачи. Для таких систем приоритетом служит безошибочная передача данных, а не скорость передачи. Мощное канальное кодирование обычно применяется совместно с некогерентными методами модуляции для обеспечения надежности систем подводной акустической связи. Такие системы обеспечивают скорости передачи порядка сотен бит в секунду [3], [4].

**1. Методы когерентной модуляции с пространственным разнесением.** Альтернативный подход к повышению скорости передачи предполагает использование множественных гидроакустических преобразователей или антенных решеток и значительного расширения рабочей полосы частот системы. Область применения данного метода ограничена необходимостью использования дополнительных преобразователей, что усложняет аппаратную и программную реализацию системы.

Когерентные методы модуляции могут применяться для решения указанных технических проблем [5], [6]. Однако такие схемы модуляции требуют сложных алгоритмов обработки сигнала в приемном устройстве, поскольку для реализации методов коррекции канала необходима значительная вычислительная мощность. Для эффективного функционирования когерентной модуляции требуется более высокое отношение сигнал/шум по сравнению с некогерентными методами.

Современные сигнальные процессоры обладают достаточной вычислительной мощностью для реализации таких систем, однако проблемой остается повышенное энергопотребление. Использование множественных антенн в одном частотном диапазоне при данном подходе модуляции улучшает скорость и качество передачи данных, несмотря на усложнение аппаратных и программных компонентов системы [7].

*1.1. Система подводной связи МТ-300.* На рис. 1 представлена система МТ-300, в которой геометрия размещения преобразователей практически горизонтальна, а прямой путь распростра-

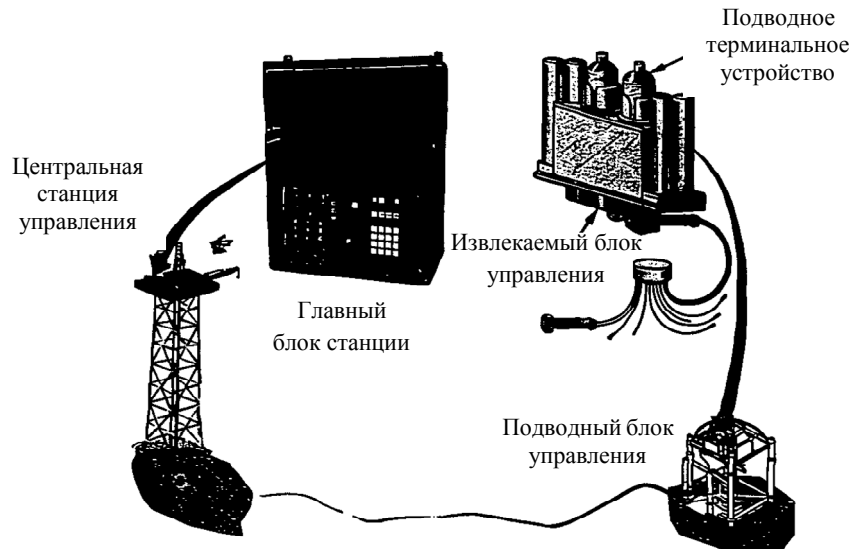


Рис. 1. Система MT-300 [4]  
Fig. 1. The MT-300 System [4]

нения сигнала отсутствует. Акустический модем интегрирован как в главный блок управления (Main System Unit, MSU), так и в подводный блок управления (Subsea Control Unit, SCU). Первоначальные технические требования к акустическому модему были удовлетворены благодаря высокой надежности модуля.

1.2. Пространственно-временное блочное кодирование Аламути. Стохастическая модель канала описывает канал передачи большой дальности без прямого пути распространения сигнала между передающей и приемной антеннами.

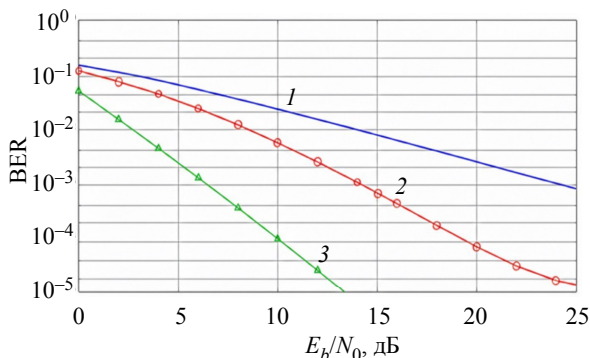


Рис. 2. Характеристика частоты появления ошибочных битов в системе передачи данных с пространственно-временным блочным кодом Аламути – двоичная фазовая манипуляция (BPSK): 1 – SISO ( $M_t = 1, M_R = 1$ ); 2 – кодирование Аламути ( $M_t = 2, M_R = 1$ ); 3 – кодирование Аламути ( $M_t = 2, M_R = 2$ ), где  $M$  – количество антенн,  $M_t$  излучающие антенны и  $M_R$  приемные антенны [7]  
Fig. 2. Bit error rate characteristic for data transmission system with Alamouti's space-time block code – binary Phase Shift Keying modulation (BPSK): 1 – SISO ( $M_t = 1, M_R = 1$ ); 2 – Alamouti coding ( $M_t = 2, M_R = 1$ ); 3 – Alamouti coding ( $M_t = 2, M_R = 2$ ), where  $M$  is the number of antennas,  $M_t$  is the transmitting antenna and  $M_R$  is the receiving antenna [7]

Характеристики вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate), определенные для конфигураций с одной и двумя приемными антеннами, представлены на рис. 2. Для достижения значения BER на уровне  $10^{-3}$  в системе с одним входом и одним выходом (Single Input Single Output, SISO) требуется отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0 = 24$  дБ.

Для системы с пространственно-временным блочным кодированием Аламути и одной приемной антенной требуется  $E_b/N_0 = 14$  дБ, а для конфигурации с двумя приемными антеннами –  $E_b/N_0 = 6.5$  дБ. В системах со множественными входами и выходами (Multiple Input Multiple Output, MIMO) тот же уровень BER может быть достигнут при снижении  $E_b/N_0$  на 10 дБ при использовании одной приемной антенны и на 17.5 дБ при использовании двух приемных антенн.

2. Методы расширения спектра в гидроакустической связи. Расширение спектра сигнала – один из наиболее эффективных методов борьбы с замираниями и помехами в каналах связи, позволяющий повысить надежность системы. Системы с расширением спектра методом прямой последовательности (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS), скачкообразной перестройкой частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) и скачкообразной перестройкой во времени (Time Hopping Spread Spectrum, THSS) – три основные категории систем с расширенным спектром [8].

Расширение спектра с использованием линейной частотной модуляции (Chirp Spread Spectrum, CSS), основанное на непрерывной модуляции несущей с линейно изменяющейся фазой и частотой

той, в последнее время привлекает значительный интерес благодаря исключительной устойчивости к многолучевому распространению и доплеровскому сдвигу частоты.

Помимо характеристик, общих для традиционных систем с расширенным спектром на основе гармонических несущих (синусоидальных и косинусоидальных), CSS более подходит для подводных акустических каналов из-за пониженной спектральной плотности мощности, повышенной устойчивости к сдвигу частоты, увеличенной дальности передачи и сниженному энергопотреблению [9].

2.1. Метод расширения спектра прямой последовательностью. Расширение спектра методом прямой последовательности (DSSS) стало исторически первой технологией расширения спектра и служит основой для современных методов.

На рис. 3 представлена структурная схема системы с прямым расширением спектра. В функциональных блоках передатчик включает в себя источник сигнала, блок дифференциального кодирования, формирующий фильтр и блок модуляции несущей, он готовит и отправляет информацию в канал связи. Вторая часть – это приемник, он состоит из блоков разложения и усиления, демодуляции, дифференциального декодирования и получателя информации. После принятого сигнала происходит обратное преобразование для восстановления исходных данных. Вспомогательные процессы и физическую среду описывают остальные элементы. Путь сигнала – это среда передачи, где воздействуют на сигнал помехи и шумы. Синхронизация обеспечивается блоками псевдослучайной синхронизации для широкополосного сигнала и общей синхронизацией между приемником и передатчиком.



Рис. 3. Система прямого расширения [9]

Fig. 3. Direct expansion system [9]

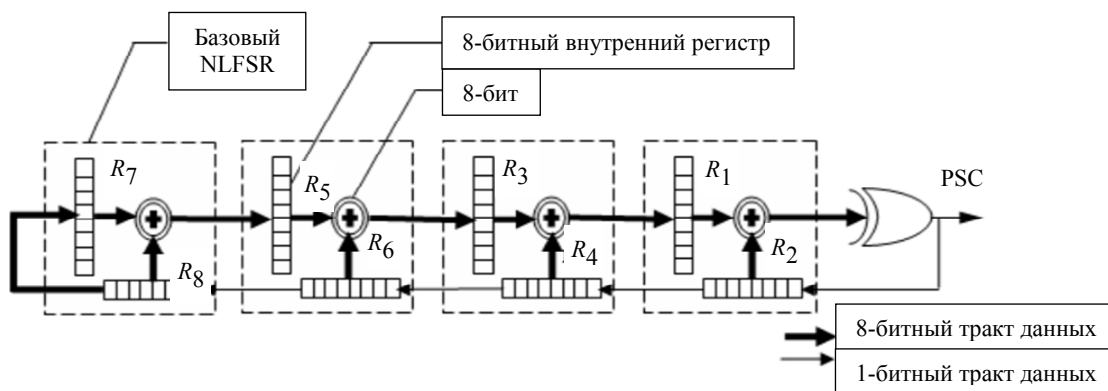


Рис. 4. Генератор псевдохаотической последовательности [11]

Fig. 4. Pseudo-chaotic sequence generator [11]

Позиционная модуляция со сдвигом во времени, технология кодовой индексной модуляции и параллельное комбинированное расширение спектра для увеличения эффективности использования полосы частот и скорости передачи информации были предложены в [10].

В частности, была предложена система связи с расширенным спектром на основе псевдохаотической последовательности PCS (Pseudo-Chaotic Sequence). Система DSSS, генерирующая псевдохаотические последовательности в качестве расширяющих кодов из хаотических отображений, существенно превосходит традиционные псевдослучайные коды PN (Pseudo-Noise). Данный метод повышает эффективность связи и снижает коэффициент битовых ошибок системы прямого расширения спектра, поскольку обладает улучшенными корреляционными свойствами по сравнению с традиционными  $m$ -последовательностями [11].

На рис. 4 представлен генератор псевдохаотической последовательности, используемый в данной работе. Где NLFSR (регистры сдвига с нелинейной обратной связью); первый набор начальных значений  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8 = 11111110, 11111101, 11111100, 11111011, 11111010, 11111001, 11111000, 11110111$  последовательно; второй набор начальных значений  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8 = 11111110, 11111101, 11111100, 11111011, 11111010, 11111001, 11111000, 11110110$  последовательно. Генератор PCS состоит из четырех последовательно соединенных ячеек. Генерируются несколько пар хаотических траекторий, начальные значения которых различаются на один бит (от младшего до старшего разряда).

**Некогерентная хаотическая система с множественными несущими.** Некогерентная хаотическая система связи с расширенным спектром и множественными несущими MIMO-MC-CSK (MIMO Multiple Carrier Chaotic Shift Keying), использующая технологию MIMO, при функционировании в различных типах каналов демонстрирует существенно лучшие характеристики по сравнению с существующими некогерентными хаотическими системами связи с расширенным спектром.

Преимущества метода:

- высокая устойчивость к многолучевому распространению;
- эффективное подавление помех;
- возможность скрытной передачи информации;
- простота реализации множественного доступа с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access).

Недостатки метода:

- в мобильной среде проявление эффекта ближней-дальней зоны усложняет практическое применение;
- ограниченный коэффициент усиления при обработке;
- ограниченные возможности подавления помех и множественного доступа.

Альтернативная система использует множественные поднесущие частоты, на которых одновременно передаются все хаотические базисные и информационные сигналы. Информационные сигналы и их опорные сигналы, хотя и используют одинаковые поднесущие, разделены во времени.

Система с множественными несущими и хаотической манипуляцией MC-CSK обеспечивает более высокую скорость передачи данных и лучшую спектральную эффективность по сравнению с системой дифференциальной хаотической манипуляции с множественными несущими MC-DCSK (Multiple Carrier Differential Chaotic Shift Keying). Система также исключает необходимость хаотической синхронизации и порогового сдвига, требуемых в традиционных системах CSK, и позволяет реализовать конструкцию без линий задержки как в передатчиках, так и в приемниках [12], [13].

На рис. 5 представлены характеристики вероятности битовой ошибки BER для различных систем. Системы MC-CSK и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов с дифференциальной хаотической манипуляцией OFDM-DCSK (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Differential Chaotic Shift Keying) используют равномерно распределенные созвездия сигналов, но с различными минимальными евклидовыми расстояниями. Применение алгоритма ортогонализации Грама–Шмидта позволяет системе MC-CSK достичь улучшенных характеристик BER по сравнению с системой на основе ортогональной многопозиционной дифференциальной хаотической манипуляции с множественными несущими OM-DCSK (Orthogonal Multi-position Differential Chaotic Shift Keying).

*2.2. Метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой времени.* Технология расширения спектра со скачкообразной перестройкой времени (THSS) преимущественно используется в системах сверхширокополосной связи UWB (Ultra-Wideband). В [14] предложена система связи с расширенным спектром, временной перестройкой и двоичной фазовой манипуляцией BPSK (Binary Phase Shift Keying), где коэффициент битовых ошибок используется в качестве критерия оценки производительности системы TH-BPSK (бинарная фазовая манипуляция с временными скачками).

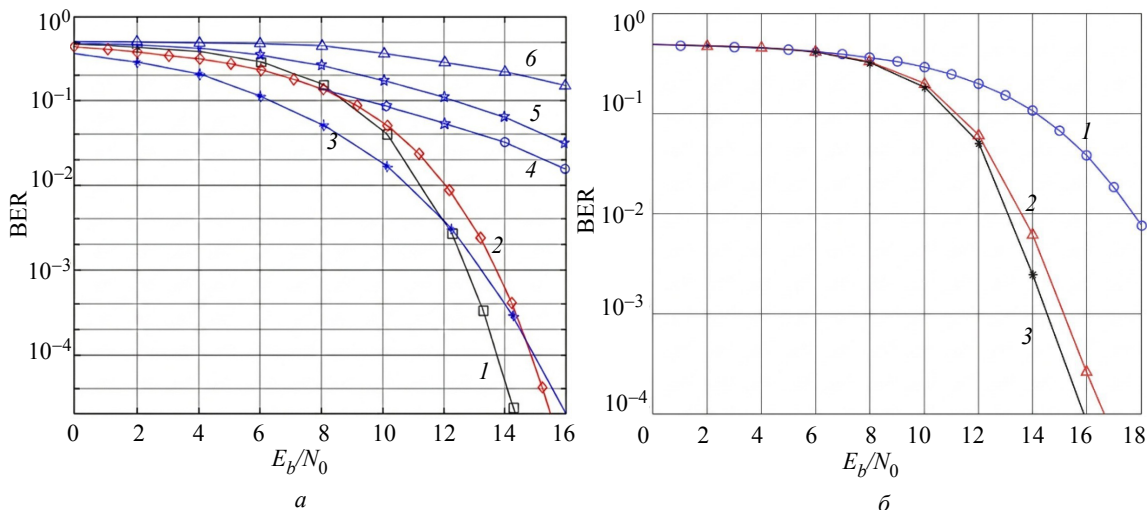


Рис. 5. а – характеристики BER MC-CSK, MR-DCSK и OFDM-DCSK по каналу AWGN (аддитивный белый гауссовский шум): 1 – MC-CSK, 2 – OFDM-DCSK, 3 – MR-DCSK (первый этап анализа), 4 – MR-DCSK (второй этап анализа), 5 – MR-DCSK (третий этап анализа), 6 – MR-DCSK (четвертый этап анализа); б – сравнение BER между MC-CSK, HCS-DCSK2 и системой с несколькими несущими на основе OM-DCSK по каналу AWGN: 1 – HCS-DCSK2, 2 – многоканальный OM-DCSK, 3 – MC-CSK [13]

Fig. 5. а – BER performances of MC-CSK, MR-DCSK and OFDM-DCSK over an AWGN (additive white Gaussian noise) channel: 1 – MC-CSK, 2 – OFDM-DCSK, 3 – MR-DCSK (1st Part), 4 – MR-DCSK (2nd Part), 5 – MR-DCSK (3rd Part), 6 – MR-DCSK (4th Part); б – BER comparison among MC-CSK, HCS-DCSK2 and the multi-carrier system based on OM-DCSK over an AWGN channel: 1 – HCS-DCSK2, 2 – multi-carrier OM-DCSK, 3 – MC-CSK [13]

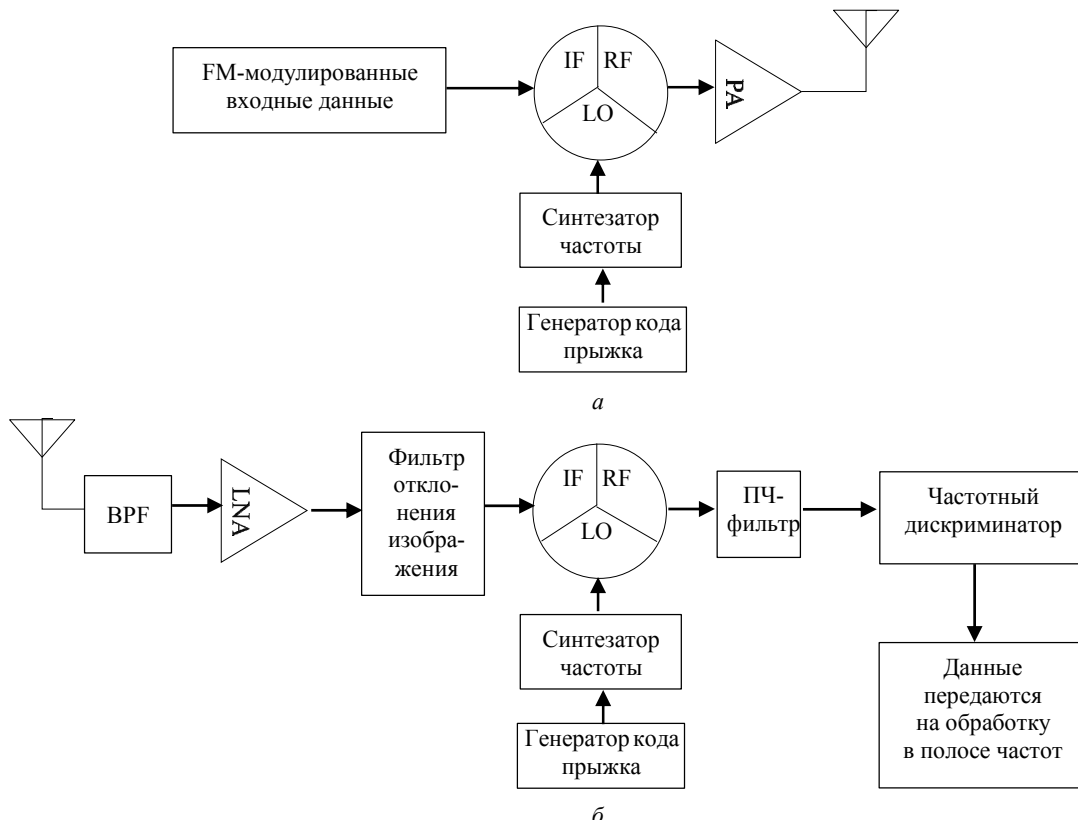


Рис. 6. Система с расширенным спектром и скачкообразной перестройкой частоты (IF – промежуточная частота, LO – гетеродин, RF – радиочастотный сигнал, PA – усилитель мощности, BPF – полосовой фильтр, LNA – малозумящий усилитель): а – передатчик; б – приемник [14]

Fig. 6. Frequency hopping spread spectrum system (IF – Intermediate Frequency, LO – Local Oscillator, RF – Radio Frequency, PA – Power Amplifier, BPF – Band Pass Filter, LNA – Low Noise Amplifier) а – transmitter; б – receiver [14]

На рис. 6 представлена структурная схема системы с расширенным спектром и скачкообразной перестройкой времени. На рис. 7 показан пример выходного сигнала передатчика с интерполированной скачкообразной перестройкой частоты (Interpolated Frequency Hopping, IFH) в координатах «частота–время».

Преимущества метода:

- снижение коэффициента заполнения по сравнению с прямым расширением спектра;
- применимость в системах множественного доступа с временным разделением каналов TDMA (Time Division Multiple Access);
- отсутствие эффекта ближней-дальней зон.

Недостатки метода:

- чрезвычайно жесткие требования к временной синхронизации;
- недостаточная скрытность передачи;
- неспособность противодействовать узкополосным помехам на фиксированной частоте.

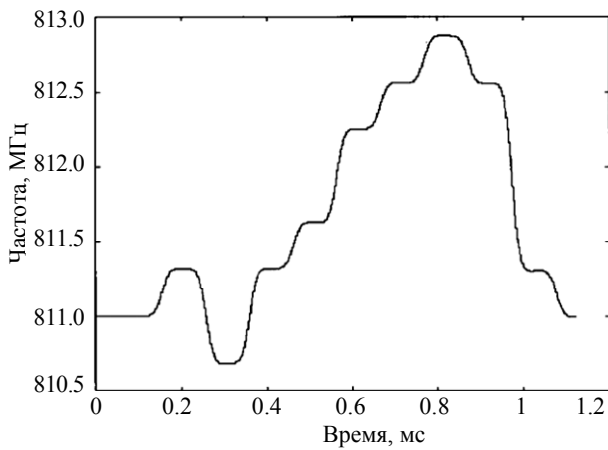


Рис. 7. Интерполированная скачкообразная перестройка частоты: частота в зависимости от времени [14]  
Fig. 7. Interpolated frequency-hopping: frequency versus time [14]

Альтернативное решение проблем, возникающих при простой скачкообразной перестройке частоты, заключается в замене сложной аналоговой

обработки цифровой, что становится эффективным компромиссом для сверхбольших интегральных схем. Ключевые отличия состоят во включении цифрового фильтра, расположенного между генератором кода скачкообразной перестройки частоты и входом управляющего слова синтезатора частоты как в передатчике, так и в приемнике, а также в цифровой обработке выходного сигнала частотного дискриминатора в приемнике.

2.3. Метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой частоты (FHSS). Данный метод обеспечивает быстрое изменение несущей частоты сигнала для охвата широкой полосы частот [9]. Системы FHSS обеспечивают определенные преимущества по сравнению с системами связи на фиксированной частоте.

На рис. 8 представлена структурная схема системы со скачкообразной перестройкой частоты.

Передатчик преобразует входные данные в широкополосный сигнал с быстро изменяющейся частотой. Первые данные, подлежащие передаче, называются бинарными, они модулируются на промежуточной частоте модулятором. Порядок скачкообразного изменения частоты определяется псевдослучайной последовательностью битов, генерируемой источником ПСП, используемым для определения доступных частотных каналов в таблице анализа каналов. С помощью алгоритма скачкообразного изменения частоты синтезатор создает несущую частоту, которая скачкообразно изменяется. После объединения сигналов модулятора и синтезатора полосовой фильтр выделяет объединенную частоту для создания широкополосного сигнала с расширенным спектром.

Приемник восстанавливает исходные данные «свертыванием» спектра, т. е. проводит обратную процедуру. Синтезатор и источник псевдослучайных битов: работают в тандеме с передатчиком, создавая

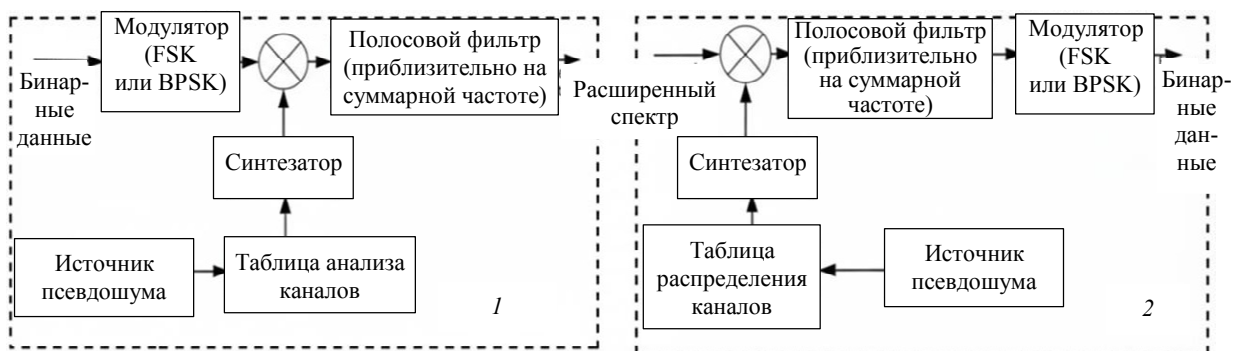


Рис. 8. Система скачкообразной перестройки частоты 1 – передатчик; 2 – приемник [9]

Fig. 8. Frequency hopping system 1 – transmitter; 2 – receiver [9]

одинаковые скачки частоты с использованием одной и той же кодовой последовательности. Таблица сопоставления каналов обеспечивает правильный прием, сопоставляя принимаемые частоты с сеткой каналов. После обратного преобразования частоты полосовой фильтр устраняет помехи сигнала и выделяет необходимую составляющую. Демодулятор принимает очищенный сигнал и выделяет исходные двоичные данные. Следует отметить, что для правильной работы необходимы кодирование псевдослучайной последовательностью и точная временная синхронизация между передатчиком и приемником.

Основные характеристики систем FHSS:

1. Высокая помехозащищенность: использование быстрого переключения псевдослучайной последовательности частот и длительного периода повторения обеспечивает высокую непредсказуемость генерируемого псевдослучайного кода благодаря множеству возможных комбинаций частот.

2. Высокий коэффициент использования спектра: использование различных схем скачкообразного изменения частоты или тактовых последовательностей позволяет одновременно функционировать нескольким системам связи FHSS в пределах определенной полосы частот, что улучшает использование спектра и облегчает совместное использование частотных ресурсов.

3. Простота реализации: технология скачкообразной перестройки частоты упрощает построение сетей связи с множественным доступом.

4. Высокая совместимость: системы связи FHSS могут интегрироваться с системами на фиксированной частоте без скачкообразной перестройки [15].

Преимущества метода:

- быстрый захват сигнала (на уровне миллисекунд);
- отсутствие эффекта ближней-дальней зоны;
- эффективный множественный доступ;
- простота построения сетевой архитектуры;
- эффективное использование спектра;
- высокая совместимость с другими системами.

Недостатки метода:

- ограниченная устойчивость к узкополосным помехам в определенных диапазонах частот;
- недостаточная способность маскировки слабых сигналов при противодействии помехам [12], [13], [16].

*2.4. Расширение спектра с использованием линейной частотной модуляции.* В отличие от других методов расширения спектра, технология расширения спектра с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), также называемая чирп-модуляцией (CSS), не требует использования псевдослучайных последовательностей для модуляции сигнала. Вместо этого расширение спектра достигается за счет встроенных линейных изменений частоты сигнала.

Данный метод обладает особыми преимуществами – это устойчивость к аддитивным шумам, к многолучевому распространению и широкополосные характеристики, обусловленные компенсацией доплеровского эффекта. Связь с расширенным спектром на основе частотной модуляции обычно применяется в ситуациях, где требуется низкая скорость передачи данных, поскольку улучшение помехозащищенности достигается за счет снижения скорости передачи [17].

В отличие от традиционной технологии расширения спектра, использующей импульсные ЛЧМ-сигналы, технология CSS широко применяется в системах подводной и воздушной акустической связи. За счет снижения скорости передачи была предложена ортогональная чирп-сигнализация, которая значительно повышает эффективность передачи обычных систем CSS, а сравнение с традиционным мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) демонстрирует существенное улучшение характеристик вероятности битовой ошибки [18].

Преимущества метода:

- компенсация доплеровского сдвига частоты при связи с подвижными объектами по сравнению с прямым расширением спектра и скачкообразной перестройкой частоты;
- эффективное противодействие доплеровскому сдвигу и глубоким замираниям.

Недостатки метода:

- низкая точность измерений;
- ограниченное разрешение при многолучевом распространении [13], [14], [19].

Для систем подводной связи исследователи рекомендуют применение технологии расширения спектра на основе чирп-модуляции [20].

На рис. 9 представлен пример комбинирования ЛЧМ-модуляции с методом прямой последовательности, где чирп-сигнал, соответствующий одному биту информации, умножается на период псевдослучайной последовательности.

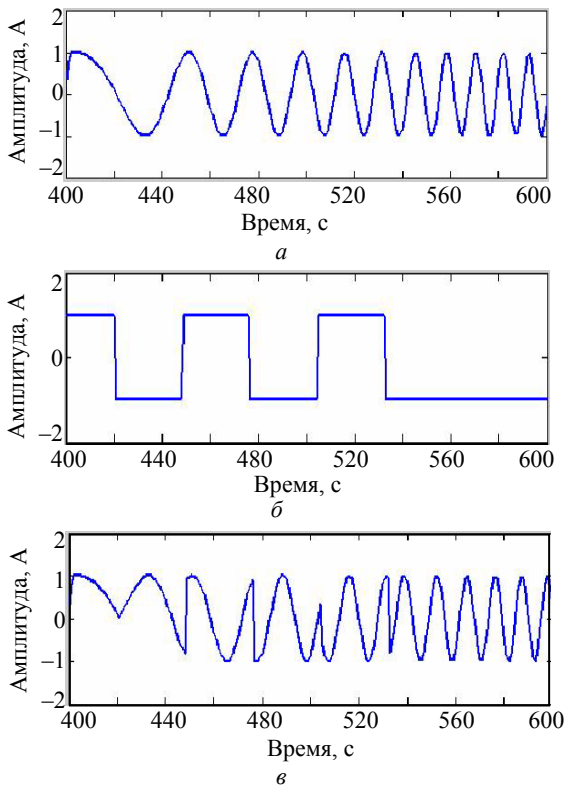


Рис. 9. Пример комбинирования ЛЧМ-модуляции с методом прямой последовательности: *a* – исходный ЛЧМ-сигнал; *b* – один период псевдослучайной последовательности; *c* – сигнал, полученный в результате умножения среднего и верхнего сигналов [20]

Fig. 9. Example of combination of chirp modulation with direct sequence approach; *a* – the original chirp signal; *b* – one period of the pseudo-random sequence; *c* – the signal obtained by multiplying the middle and upper signals [20]

В отличие от FHSS и DSSS, метод CSS использует частотную линейность самого чирп-сигнала вместо добавления псевдослучайной последовательности. Чирп-сигналы обладают более высокими коэффициентами усиления при обработке и встроенными помехоустойчивыми свойствами по сравнению с традиционными сигналами с расширенным спектром. Они также демонстрируют определенные успехи в компенсации доплеровского сдвига частоты. Благодаря этим особенностям технология CSS может эффективно применяться для подводной акустической связи, и соответствующие исследования переходят на стадию практического применения.

*Методы повышения скорости передачи в системах CSS.* Скорость передачи данных методом CSS, которая часто составляет несколько десятков битов в секунду или даже несколько битов в секунду, затрудняет его использование в гидроакустическом канале с серьезными ограничениями пропускной способности при непосредственном примене-

нии. *M*-ичная модуляция и модуляция с множественными несущими являются основными методами повышения скорости передачи данных при использовании подхода с расширенным спектром.

Данный подход реализуется в двух основных категориях:

1. Построение *M*-ичной системы с расширенным спектром с использованием ортогональных псевдослучайных кодов. Для повышения эффективности использования спектра в [21] псевдослучайные коды выполняют *M*-ичное расширение спектра для переноса битовой информации. В расширенном спектре с импульсно-позиционной модуляцией (Spread Spectrum Pulse Position Modulation, SS-PPM) используются две *M*-последовательности, при этом минимальная разница во времени между ними составляет  $t_{\text{чип}}$ , поскольку временное разрешение *M*-последовательности равно длительности одного элементарного импульса (чипа), как показано на рис. 10, где  $M_1$  – референсный хаотический сигнал;  $M_2$  – информационный сегмент;  $t_{\text{dif}}$  – временная задержка;  $t_{\text{sym}}$  – длительность одного полного символа;  $t_{\text{чип}}$  – длительность одного чипа.

Последовательность данных

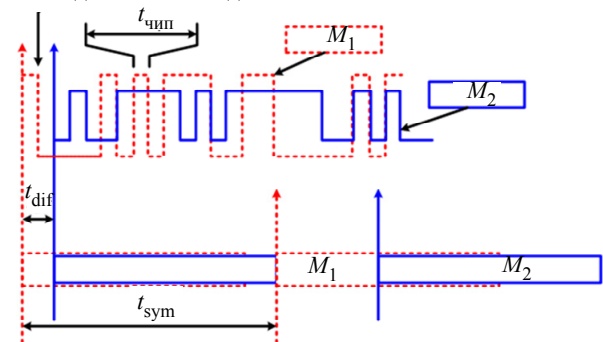


Рис. 10. Схема импульсно-позиционной модуляции с расширенным спектром (SS-PPM [21])

Fig. 10. Diagram for Spread Spectrum Pulse Position Modulation (SS-PPM) [21]

Система расширения спектра с более высокой скоростью передачи данных на основе ортогональных последовательностей была предложена в [22]. Посредством многолучевой временно-пространственной фокусировки подводная связь DSSS с пассивным обращением времени была исследована в [23] с целью дальнейшего улучшения характеристик. Кроме того, для увеличения коэффициента расширения спектра в [24] была разработана система связи, основанная на *M*-ичном биомиметическом кодировании сигналов.

2. Использование фазового сдвига псевдослучайного кода для передачи битовой информации. В [25] была реализована циклическая сдвиговая манипуляция посредством вставки базовой несущей (расширяющая последовательность на основе псевдослучайного кода или линейная частотная модуляция, гиперболическая частотная модуляция) между синхронизацией и данными для улучшения характеристик системы. Этот метод позволяет снизить требования к синхронизации.

В [26] была предложена схема расширения спектра с циклическим сдвигом, которая улучшает скорость связи и эффективность использования полосы пропускания. В данной модуляции используются два псевдослучайных кода одинаковой длины с низкой взаимной корреляцией. Циклическое смещение между последовательностями используется для переноса информации. На рис. 11 представлена схема модуляции. Сигнал  $C_1$  обеспечивает синхронизацию  $C_2$  во время демодуляции, что снижает влияние ошибки синхронизации.

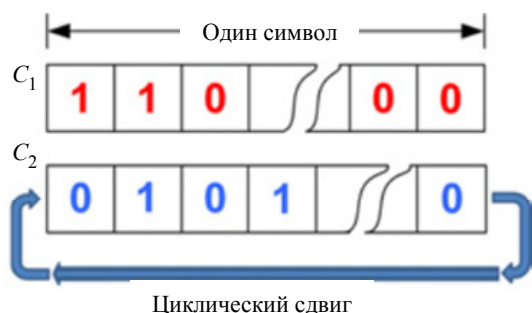


Рис. 11. Иллюстрация модуляции [26]  
Fig. 11. The illustration of modulation [26]

На рис. 12 представлены примеры нормализованной импульсной характеристики канала с временной эволюцией. Общая энергия излучаемого импульса растет с увеличением периода. Результаты работы структуры приемника с обращением времени показаны на рис. 13.

Достигнут минимальный коэффициент битовых ошибок примерно в точке (0.0038 на 7-й, 19-й и на 31-й мин) с 8 канальном системой. Повторяющиеся интервалы между локальными минимумами демонстрируют, что длительность одного замера BER составляет 2.3...2.5 мин. Так как время охватывает более 30 мин то в 30-минутный интервал укладываются 14 точек замера. На протяжении 14 интервалов BER снижается с увеличением числа приемных каналов, а характеристики структуры с обращением времени улучшаются за счет использования большего количества кана-

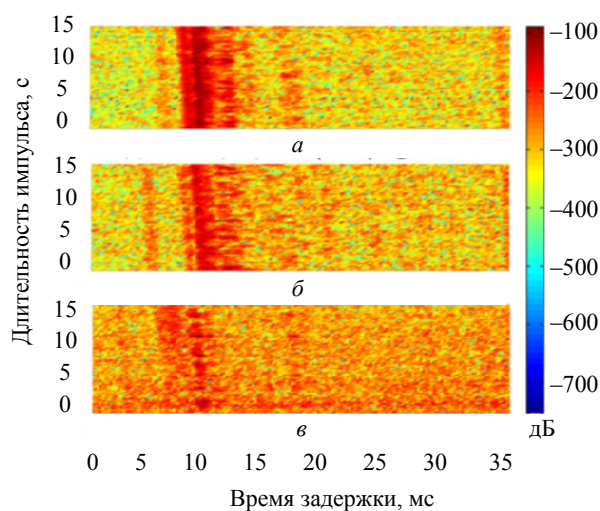


Рис. 12. Примеры нормализованной импульсной характеристики канала с временной эволюцией: а – период 1, сильная зашумленность, б – период 7, увеличение длительности сигнала в 7 раз соответственно, в – период 15, полезный сигнал гораздо очевиднее (повышение помехоустойчивость) [26]  
Fig. 12. Examples of normalized channel impulse response with time evolution: а – period 1, strong noise pollution, б – period 7, increasing the signal duration by 7 times accordingly, в – period 15, the useful signal stands out in much greater contrast (increased noise immunity) [26]

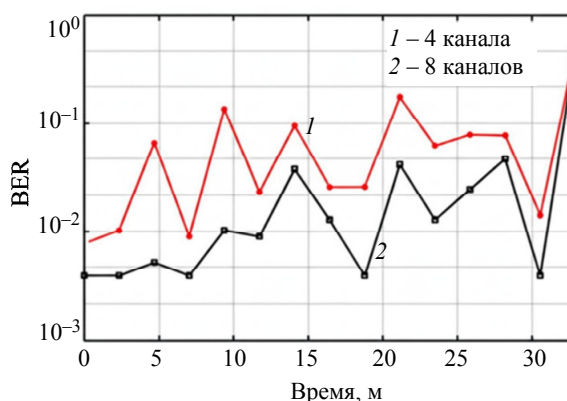


Рис. 13. Характеристики структуры приемника обращения времени [26]  
Fig. 13. Performance of the time reversal receiver structure [26]

лов. Очевидно, что пространственное разнесение используется для повышения эффективности при фокусировке с обращением времени.

Новый метод расширения спектра на основе хаотической прямой последовательности был предложен для защищенной гидроакустической связи в [27]. Для снижения сложности системы и повышения скорости связи была предложена система подводной акустической связи с прямым расширением спектра в [28].

Комбинирование методов 1 и 2 для улучшения характеристик. Выход согласованного фильтра анализируется в [29]. По сравнению с традицион-

ными DSSS и FHSS метод расширения спектра CSS значительно упрощает схему синхронизации за счет использования согласованных фильтров вместо сложных компонентов для захвата и отслеживания псевдослучайного кода. Чирп-несущие устойчивы к доплеровскому эффекту и обладают определенной устойчивостью к сдвигам частоты широкополосных сигналов. В заключение следует отметить, что CSS более подходит для подводной акустической связи и проще в реализации временной и частотной синхронизации, чем стандартные DSSS и FHSS.

**2.5. Хаотическое расширение спектра.** Реализация системы подводной акустической связи с низким коэффициентом битовых ошибок существенно затруднена из-за сильного затухания, ограниченной доступной полосы пропускания, многолучевого распространения, доплеровского эффекта, сложных акустических шумов окружающей среды и интенсивных помех, характерных для подводного акустического канала.

Поскольку связь с расширенным спектром может обеспечить конфиденциальность и устойчивость к шумам и помехам, именно этот протокол связи относится к наиболее широко используемым. Технология связи с хаотическим расширенным спектром представляет собой синтез технологии расширенного спектра и теории хаоса.

Псевдослучайные коды, например  $M$ -последовательности и последовательности Голда (Gold), используются в качестве расширяющих кодов в традиционной связи с расширенным спектром. Значительные выбросы могут быть обнаружены в функциях взаимной корреляции псевдослучайных кодов, которые обычно генерируются регистрами сдвига с линейной обратной связью и имеют фиксированную периодическую структуру в условиях многолучевого распространения.

Хаотические сигналы при использовании в качестве расширяющих последовательностей могут превосходить традиционные псевдослучайные коды благодаря их аперриодической природе. Две основные категории хаотической связи с расширенным спектром – это хаотическое расширение спектра действительных значений CRSS (Continuous-valued chaotic Real-valued Spread Spectrum) и хаотическое расширение спектра двоичных значений CBSS (Chaotic Binary Spread Spectrum).

Основная цель исследований CBSS – создание хаотических последовательностей с расширенным спектром, обладающих хорошими корреляционны-

ми свойствами и балансом. В [30] представлен усовершенствованный метод выбора последовательностей, который обеспечивает низкий коэффициент битовых ошибок в многопользовательской связи с хаотической прямой последовательностью и множественным доступом с кодовым разделением каналов (DS-CDMA). Алгоритм предназначен для улучшения характеристик баланса и корреляции хаотических последовательностей.

Системы связи, основанные на хаосе, обладают несколькими привлекательными характеристиками – повышенной конфиденциальностью, помехозащищенностью и устойчивостью к замираниям, обусловленным многолучевым распространением [31]–[33]. Это связано с широкополосной и непрерывной спектральной природой хаотических сигналов. Показано, что системы связи на основе хаоса обеспечивают максимальное отношение сигнал/шум. Характеристики помехоустойчивости превосходны в сочетании с соответствующим согласованным фильтром [34].

Помимо обеспечения надежных сетей связи в сложных условиях, хаотические системы могут способствовать достижению более высоких скоростей передачи данных [35]. Хаотический сигнал или его квантованный вариант используется в качестве расширяющей последовательности для модуляции передаваемых данных в таких когерентных системах связи, как хаотическая манипуляция CSK (Chaos Shift Keying) и множественный доступ с кодовым разделением каналов на основе хаоса и прямой последовательности [36].

В системах связи, например CDMA, OFDM и сверхширокополосный доступ (UWB), также применяется технология хаотического расширения спектра [37]–[39]. Большинство ранее изложенных методик ориентированы на беспроводные каналы связи в свободном пространстве. Подобно другим видам беспроводной связи [40], [41], методы выравнивания должны использоваться для компенсации значительных искажений, вызванных подводным акустическим каналом, при применении методов связи с хаотическим расширением спектра в этих каналах [42].

На рис. 14 представлены результаты после компенсации постоянного доплеровского сдвига при длине последовательности  $N = 127$  и доплеровском сдвиге 5 Гц. Ошибки не обнаружены, однако наблюдается более выраженный фазовый сдвиг и деградация характеристик из-за медленного отслеживания фазы.

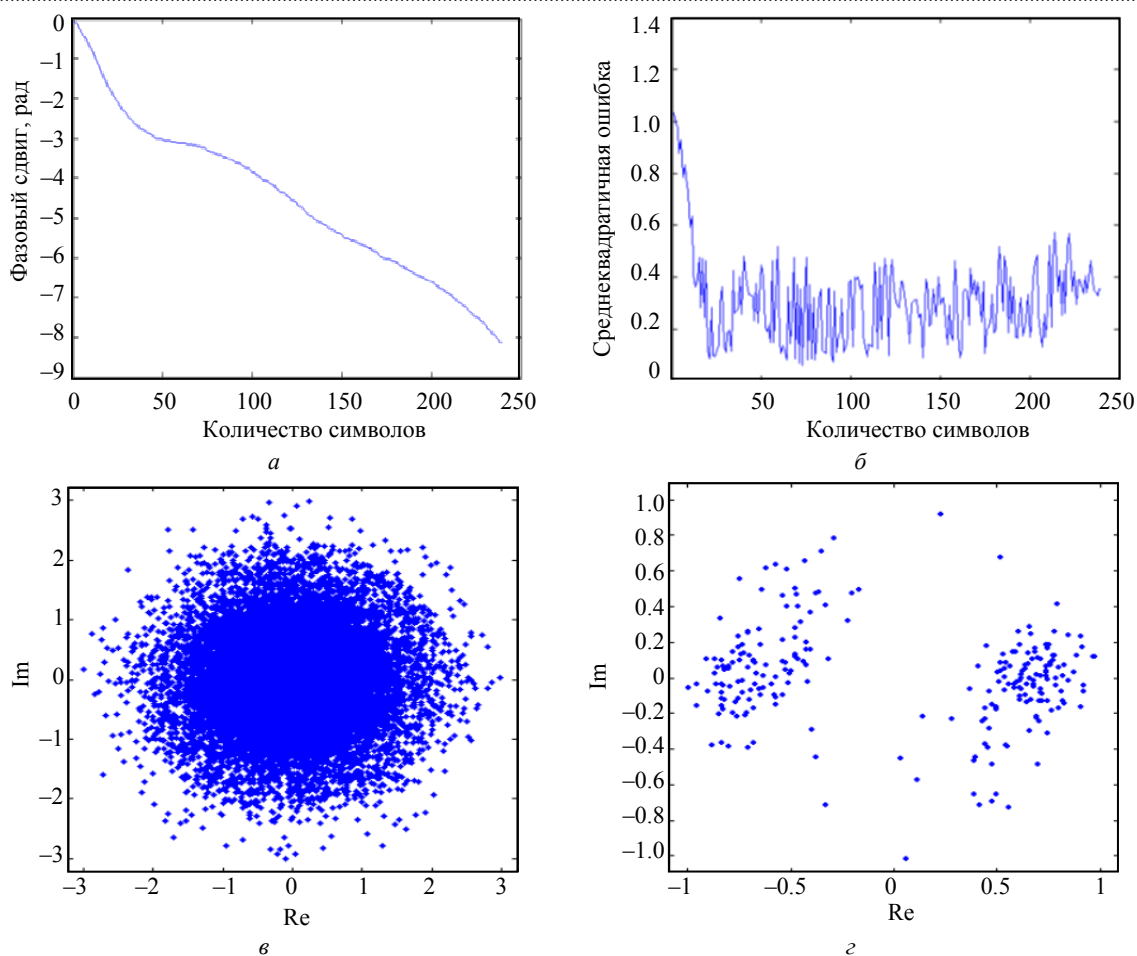


Рис. 14. Результаты, полученные при передаче сигналов со скоростью 64 и 16 бит/с на расстояние 300 м, где отношение сигнал/шум составляет около 8 дБ: *a* – слежение за фазой несущей; *б* – характеристики приемника (квадратичная ошибка); *в* – диаграмма рассеяния входного чипа; *г* – диаграмма рассеяния выходных символов [42]

Fig. 14. The results obtained with signals transmitted at the rate of 64 and 16 b/s over 300 m, where SNR is about 8 dB: *a* – the carrier phase tracking; *б* – performance of the receiver (squared error); *в* – input chip scatter plot; *г* – output symbol scatter plot [42]

**3. Гидроакустические модемы.** Изменяющаяся во времени многолучевость и флуктуирующий гидроакустический канал могут приводить к межсимвольной интерференции (Inter-Symbol Interference, ISI), а также доплеровским сдвигам и расширению спектра [43], [44].

В последнее время было выпущено множество коммерческих гидроакустических модемов. Ниже представлен обзор основных коммерческих решений:

1. *Модем Teledyne Benthos ATM-886.* Модель ATM-886 компании Teledyne Benthos ранее имела защитный интервал от многолучевого распространения, сверточное кодирование со скоростью 1/2, методы модуляции с множественной частотной (Multiple Frequency Shift Keying, MFSK) и фазовой (Phase Shift Keying, PSK) манипуляциями [45]. Скорость передачи данных составляла 360 бит/с.

2. *Модем SoundLink компании LinkQuest.* Модем SoundLink компании LinkQuest использует технологию широкополосного акустического расширения спектра. Достигается максимальная скорость передачи данных 38 400 бит/с [45].

3. *Модем AquaSeNT.* Используя технологию мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), компания AquaSeNT предлагает модем гидроакустической связи. Эти модемы имеют два режима функционирования: режим передачи данных и командный режим [45].

4. *Модем DSPComm Aquacom Gen2.* В условиях сильного многолучевого распространения и интенсивных шумов модемы DSPComm Aquacom Gen2 могут функционировать ниже минимального уровня шума при отношении сигнал/шум от -10 до -15 дБ с доплеровской коррекцией для скоростей перемещения  $\pm 10$  узлов. Модем доступен с технологиями OFDM и расши-

ренного спектра прямой последовательности DSSS на скоростях передачи от 100 до 1000 бит/с. Испытания проводились на дистанции до 8 км [45].

5. *Модем «Микрон».* Для расширенного спектра с чирп-модуляцией CSS рабочая полоса частот модема «Микрон» составляет 20...28 кГц. Модем передачи данных «Микрон» имеет пропускную способность 40 бит/с, компактные размеры, низкий коэффициент битовых ошибок, подавление многолучевых помех и дальность действия 500 и 150 м в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно [46].

6. *Модем EvoLogics.* Полнодуплексная связь реализуется благодаря технологии развертки (sweep spread spectrum), которая лежит в основе модема подводной связи компании EvoLogics. Модем функционирует в диапазоне частот 18...34 кГц и может передавать данные со скоростью до 13.9 кбит/с на расстояние до 3500 м [46].

7. *Применение технологии расширенного спектра.* Благодаря устойчивости к искажениям подводного беспроводного канала технология расширенного спектра нашла широкое применение в подводной беспроводной связи [47]. Основными примерами служат метод расширения спектра со скачкообразной перестройкой частоты FHSS, расширение спектра прямой последовательностью DSSS и метод расширения спектра с чирп-модуляцией CSS.

Метод CSS широко используется, поскольку он компенсирует недостатки других методов расширения спектра и использует широкую полосу пропускания для защиты от различных типов частотно-избирательных замираний. Традиционно в подходе CSS используются сигналы линейной частотной модуляции (Linear Frequency Modulation, LFM). Использование формы сигнала с нелинейной частотной модуляцией (Non-Linear Frequency Modulation, NLFM) позволяет достичь низких уровней боковых лепестков без снижения отношения сигнал/шум [48].

**Закключение.** В настоящее время активно развиваются технологии подводной связи. Гидроакустическая связь необходима как для коммуникации с подводными пловцами, так и для управления необитаемыми подводными аппаратами. Скорость передачи данных по гидроакустическому каналу остается низкой, при этом системы подводной связи должны обеспечивать безошибочную передачу данных с использованием оптимизированных сигналов и алгоритмов обработки.

Применение всех методов, используемых в радиолокации и радиосвязи, в подводной связи невозможно из-за специфики распространения акустических сигналов в водной среде. В настоящей статье рассмотрены основные методы модуляции и типы сигналов, применимые в современной гидроакустической связи.

Методы гидроакустической связи требуют дальнейшего совершенствования для увеличения скорости передачи данных и снижения вероятности битовых ошибок при передаче. Необходимо совершенствовать не только алгоритмы обработки и методы модуляции, но и антенные системы. Антенные системы должны обеспечивать широкополосный прием и излучение с хорошей равномерностью амплитудно-частотных характеристик во всем рабочем диапазоне частот.

Особенно перспективны следующие направления развития:

- разработка адаптивных систем модуляции и кодирования;
- применение методов искусственного интеллекта для обработки сигналов;
- создание гибридных систем, комбинирующих различные методы расширения спектра;
- разработка энергоэффективных алгоритмов обработки для автономных подводных аппаратов;
- совершенствование методов компенсации доплеровского эффекта и многолучевого распространения.

#### Список литературы

1. Мухсин Х. К. М., Пивнев П. П., Калюта В. И. Обзор широкополосных гидроакустических преобразователей на основе пьезокомпозигов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 28–43. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-28-43.

2. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. New York, NY: Springer, 2012. 540 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9777-7.

3. Software-defined underwater acoustic modems: historical review and the NILUS Approach / H. S. Dol, P. Casari, T. van der Zwan, R. Otnes // IEEE J. of Oceanic Engin. 2017. Vol. 42, no. 3. P. 722-737. doi: 10.1109/JOE.2016.2598412.

4. Garrood D. Applications of the MFSK acoustic communications system // Oceans 81. Boston, MA, USA: IEEE, 1981. P. 67–71. doi: 10.1109/OCEANS.1981.1151697.

5. Stojanovic M., Catipovic J. A., Proakis J. G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels // *IEEE J. Ocean. Engin. IEEE*, 1994. Vol. 19, no. 1. P. 100–111. doi: 10.1109/48.289455.
6. Kochanska I., Schmidt J. H., Marszal J. Shallow water experiment of OFDM underwater acoustic communications // *Archives of Acoustics*. 2020. Vol. 45, no. 1. P. 11–18. doi: 10.24425/aoa.2019.129737.
7. Schmidt J. H., Schmidt A. M., Kochanska I. Multiple-input multiple-output technique for underwater acoustic communication system // *Proc. of 2018 Joint Conf. Acoustics*. 2018. Ustka, Poland: IEEE, 2018. P. 1–14. doi: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502439.
8. Pickholtz R. L., Schilling D. L., Milstein L. B. Theory of spread-spectrum communications—a tutorial // *IEEE Trans. Commun. IEEE*, 1982. Vol. 30, no. 5. P. 855–884. doi: 10.1109/TCOM.1982.1095533.
9. Ma L., Zhang X., Zhan L. Overview of commonly used spread spectrum techniques // *Academic J. of Engin. and Technol. Sci.* 2023. Vol. 6, no. 12. P. 83–92. doi: 10.25236/AJETS.2023.061213.
10. Maskara Sh. L., Chakrabarti S. Spread Spectrum Communications – A Review // *IETE Techn. Rev.* 2015. Vol. 10, no. 4. P. 389–398. doi: 10.1080/02564602.1993.11437360.
11. An FPGA implementation of a pseudo-chaotic direct sequence spread spectrum (DS-SS) communication system / M. V. Mandi, R. S. Kulal, S. S. Kumar, D. Dileep, Ya. Padiyar // *Int. J. Nonlinear Sci.* 2009. Vol. 8, no. 4. P. 387–401.
12. Wang Sh., Zhang Zh. Multicarrier chaotic communications in multipath fading channels without channel estimation // *AIP Advances*. 2015. Vol. 5, no. 1. Art. 017139. P. 1–9. doi: 10.1063/1.4906984.
13. Multi-carrier chaos shift keying: System design and performance analysis / H. Yang, W. K. S. Tang, G. Chen, G.-P. Jiang // *IEEE Trans. on Circuits and Syst. I: Regular Papers*. 2017. Vol. 64, no. 8. P. 2182–2194. doi: 10.1109/TCSI.2017.2685344.
14. An interpolated frequency-hopping spread-spectrum transceiver / N. M. Filiol, C. Plett, T. A. D. Riley, M. A. Copeland // *IEEE Trans. on Circuits and Syst. II: Analog and Digital Signal Proc.* 2002. Vol. 45, no. 1. P. 3–12. doi: 10.1109/82.659452.
15. Yen D. C., Chou D. C., Tarn J. M. Applications and development of spread spectrum technology // *Technol. in Society*. 2000. Vol. 22, no. 4. P. 525–535. doi: 10.1016/S0160-791X(00)00025-7.
16. Hybrid DS/FFH spread-spectrum: a robust, secure transmission technique for communication in harsh environments / M. M. Olama, Xiao Ma, T. P. Kuruganti, S. F. Smith, S. M. Djouadi // *2011-MILCOM 2011 Military Communications Conf. Baltimore, MD, USA: IEEE*, 2011. P. 2136–2141. doi: 10.1109/MILCOM.2011.6127636.
17. Noreen U., Bounceur A., Clavier L. A study of LoRa low power and wide area network technology // *2017 Intern. Conf. on Advanced Technol. for Signal and Image Proc. (ATSIP)*. Fez, Morocco: IEEE, 2017. P. 1–6. doi: 10.1109/ATSIP.2017.8075570.
18. A anti-jamming method for satellite navigation system based on multi-objective optimization technique / R. Lang, H. Xiao, Zi Li, L. Yu // *PLoS one*. 2017. Vol. 12, no. 7. P. e0180893. doi: 10.1371/journal.pone.0180893.
19. Liu H. BPSK/BOC modulation signal system for GPS satellite navigation signals // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2022. Vol. 2384, no. 1. P. 012023. doi: 10.1088/1742-6596/2384/1/012023.
20. Spread spectrum modulation for acoustic communication in shallow water channel / M. Palmese, G. Bertolotto, A. Percetto, A. Trucco // *Oceans 2007-Europe*. Aberdeen, UK: IEEE, 2007. P. 1–4. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302308.
21. An efficient spread spectrum pulse position modulation scheme for point-to-point underwater acoustic communication / G. Zhang, J. M. Hovem, H. Dong, Sh. Zhou, Sh. Du // *Appl. acoustics*. 2010. Vol. 71, no. 1. P. 11–16. doi: 10.1016/j.apacoust.2009.07.010.
22. Yang Y., Duan M. M-Ary spread spectrum code division multiple access underwater acoustic communication // *3<sup>rd</sup> Workshop on Advanced Research and Technol. in Industry (WARTIA 2017)*. Guilin, China: Atlantis Press, 2017. P. 35–39. doi: 10.2991/wartia-17.2017.7.
23. Spread spectrum underwater acoustic communication based on passive time reversal in time varying channels / Y. Zhou, X. Cao, Y. Wu, F. Tong // *J. Appl. Acoust.* 2015. Vol. 34, no. 6. P. 509–515. doi: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.06.006.
24. Experimental demonstration of underwater acoustic communication using bionic signals / X. Han, J. Yin, P. Du, X. Zhang // *Appl. Acoustics*. 2014. Vol. 78. P. 7–10. doi: 10.1016/j.apacoust.2013.10.009.
25. He C., Zhang Q., Huang J. Passive time reversal communication with cyclic shift keying over underwater acoustic channels // *Appl. Acoustics*. 2015. Vol. 96, no. 4. P. 132–138. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.03.022.
26. Zhang G., Dong H. Experimental demonstration of spread spectrum communication over long range multipath channels // *Appl. acoustics*. 2012. Vol. 73, no. 9. P. 872–876. doi: 10.1016/j.apacoust.2012.03.002.
27. Chaotic direct sequence spread spectrum for secure underwater acoustic communication / X. Shu, J. Wang, H. Wang, X. Yang // *Appl. Acoustics*. 2016. Vol. 104. P. 57–66. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.10.015.
28. An underwater acoustic spread-spectrum system using RA coding and band-pass signal acquisition / L. Liu, X. Zhang, Q. Wang, L. Li // *2009 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Wireless Comm., Network. and Mobile Comp.* Beijing, China: IEEE, 2009. P. 1–4. doi: 10.1109/WICOM.2009.5301418.
29. Parsons J. D., Parsons P. J. D. The mobile radio propagation channel. Halsted Press, 1992. 316 p.
30. An optimized selection algorithm via adaptive correlation threshold on integrated chaotic spread-spectrum sequences / L. Sijia, M. Yu-quan, L. Bo, P. Wei-Dong, P. Xin // *2011 Int. Conf. on Wireless Comm. and Signal Proc. (WCSP)*. Nanjing, China: IEEE, 2011. P. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096721.
31. Kurian A. P., Puthusserypady S., Htut S. M. Performance enhancement of DS/CDMA system using cha-

otic complex spreading sequence // IEEE Transactions on wireless communications. 2005. Vol. 4, no. 3. P. 984–989. doi: 10.1109/TWC.2005.847028.

32. Yu J., Yao Y. D. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms // IEEE Trans. on wireless communications. 2005. Vol. 4, no. 2. P. 390–396. doi: 10.1109/TWC.2004.842948.

33. Lau F. C. M., Tse C. K. Chaos-based digital communication systems. Operating principles, analysis methods and performance evaluation. Verlag, Berlin: Springer, 2003.

34. Corron N. J., Blakely J. N. Chaos in optimal communication waveforms // Proc. of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Engin. Sci. 2015. Vol. 471, no. 2180. P. 20150222. doi: 10.1098/rspa.2015.0222.

35. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links / A. Argyris, D. Syridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I. Fischer, J. Garcia-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, K. Alan Shore // Nature. 2005. Vol. 438, no. 7066. P. 343–346. doi: 10.1038/nature04275.

36. Exact analytical bit error rates for multiple access chaos-based communication systems / W. M. Tam, F. C. M. Lau, C. K. Tse, A. J. Lawrance // IEEE Trans. on Circuits and Syst. II: Express Briefs. IEEE, 2004. Vol. 51, no. 9. P. 473–481. doi: 10.1109/TCSII.2004.832773.

37. Advances in computer science and its applications / H. Y. Jeong, M. S. Obaidat, N. Y. Yen, J. J. Park. Springer Berlin, Heidelberg. CSA 2013. Springer Science & Business Media, 2013. Vol. 279. 749 p. doi: 10.1007/978-3-642-41674-3.

38. Wang Sh., Zhu J., Zhou J. OFDM-based chaotic spread spectrum communications with high bandwidth efficiency // 2012 Intern. Conf. on Control Engin. and Comm. Technol. Shenyang, China: IEEE, 2012. P. 940–943. doi: 10.1109/ICCECT.2012.139.

39. Li D., Bo J. F. Design of the DS-UWB communication system based on Chaotic Variable Spreading Factor // 2011 Seventh Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security. Sanya, China: IEEE, 2011. P. 717–720. doi: 10.1109/CIS.2011.163.

40. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication / H. P. Ren, C. Bai, Q. Kong, M. S. Baptista, C. Grebogi // Phys. A: Statist. Mechan. and

its Appl. 2017. Vol. 478. P. 77–92. doi: 10.1016/j.physa.2017.02.036.

41. A coherent underwater acoustic communication system based on joint iterative equalization and decoding algorithm / S. Tianyu, Y. Zhaokai, Yu. Li, S. Guiqing, H. Haining, Z. Chunhua // 2010 IEEE Youth Conf. on Inform., Comp. and Telecommun. Beijing: IEEE, 2010. P. 73–76. doi: 10.1109/YCICT.2010.5713048.

42. A chaotic direct sequence spread spectrum communication system in shallow water / L. Lei, F. Xu, Y. Xu, Y. Wu // 2011 Intern. Conf. on Control, Automation and Syst. Engin. (CASE). Singapore: IEEE, 2011. P. 1–4. doi: 10.1109/ICCSE.2011.5997600.

43. Van Walree P., Jenserud T., Song H. Characterization of overspread acoustic communication channels // Proc. of the 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Underwater Acoust. (ECUA 2010). URL: [https://www.researchgate.net/publication/228873817\\_Characterization\\_of\\_overspread\\_acoustic\\_communication\\_channels](https://www.researchgate.net/publication/228873817_Characterization_of_overspread_acoustic_communication_channels) (дата обращения: 15.11.2025).

44. Yang T. C. Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water // J. of the Acoust. Soc. of America. 2006. Vol. 120, no. 5. P. 2595–2614.

45. Experimental results of underwater acoustic communication with nonlinear frequency modulation waveform / J. An, H. Ra, C. Youn, K. Kim // Sensors (Basel). 2021. Vol. 21, no. 21. P. 7194. doi: 10.3390/s21217194.

46. Stojanovic M., Beaujean PP. J. Acoustic communication. In: Dhanak, M. R., Xiros, N. I. (eds) Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer Handbooks. Springer, Cham. P. 359–386. doi: 10.1007/978-3-319-16649-0\_15.

47. Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication / L. Freitag, M. Stojanovic, S. Singh, M. Johnson // IEEE J. of Oceanic Eng. 2002. Vol. 26, no. 4. P. 586–593. doi: 10.1109/48.972098.

48. Collins T., Atkins Ph. Nonlinear frequency modulation chirps for active sonar // IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. IEEE, 1999. Vol. 146, no. 6. P. 312–316. doi: 10.1049/ip-rsn:19990754.

## Информация об авторе

**Альсаид Хайдер Карим Мехсин** – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологическая академии Южного федерального университета, ул. Шевченко, 2, корп. Е, 347922, Таганрог, Россия.  
E-mail: mukhsin@sfedu.ru

## References

1. Muhsin H. K. M., Pivnev P. P., Kalûta V. I. Obzor širokopolosnyh gidroakustičeskikh preobrazovatelej na osnove pezokompozitov // Izv. SPbGËTU «LËTI». 2025. T. 18, № 3. S. 28–43. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-28-43. (In Russ.).

2. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of Shallow Water Acoustics. New York, NY: Springer, 2012. 540 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9777-7.

3. Software-defined underwater acoustic modems: historical review and the NILUS approach / H. S. Dol,

- P. Casari, T. van der Zwan, R. Otnes // *IEEE J. of Oceanic Engin.* 2017. Vol. 42, no. 3. P. 722-737. doi: 10.1109/JOE.2016.2598412.
4. Garrood D. Applications of the MFSK acoustic communications system // *Oceans 81*. Boston, MA, USA: IEEE, 1981. P. 67–71. doi: 10.1109/OCEANS.1981.1151697.
5. Stojanovic M., Catipovic J. A., Proakis J. G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels // *IEEE J. Ocean. Engin.* IEEE, 1994. Vol. 19, no. 1. P. 100–111. doi: 10.1109/48.289455.
6. Kochanska I., Schmidt J. H., Marszal J. Shallow water experiment of OFDM underwater acoustic communications // *Archives of Acoustics*. 2020. Vol. 45, no. 1. P. 11–18. doi: 10.24425/aoa.2019.129737.
7. Schmidt J. H., Schmidt A. M., Kochanska I. Multiple-input multiple-output technique for underwater acoustic communication system // *Proc. of 2018 Joint Conf. Acoustics*. 2018. Ustka, Poland: IEEE, 2018. P. 1–14. doi: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502439.
8. Pickholtz R. L., Schilling D. L., Milstein L. B. Theory of spread-spectrum communications—a tutorial // *IEEE Trans. Commun.* IEEE, 1982. Vol. 30, no. 5. P. 855–884. doi: 10.1109/TCOM.1982.1095533.
9. Ma L., Zhang X., Zhan L. Overview of commonly used spread spectrum techniques // *Academic J. of Engin. and Technol. Sci.* 2023. Vol. 6, no. 12. P. 83–92. doi: 10.25236/AJETS.2023.061213.
10. Maskara Sh. L., Chakrabarti S. Spread Spectrum Communications – A Review // *IETE Techn. Rev.* 2015. Vol. 10, no. 4. P. 389–398. doi: 10.1080/02564602.1993.11437360.
11. An FPGA implementation of a pseudo-chaotic direct sequence spread spectrum (DS-SS) communication system / M. V. Mandi, R. S. Kulal, S. S. Kumar, D. Dileep, Ya. Padiyar // *Int. J. Nonlinear Sci.* 2009. Vol. 8, no. 4. P. 387-401.
12. Wang Sh., Zhang Zh. Multicarrier chaotic communications in multipath fading channels without channel estimation // *AIP Advances*. 2015. Vol. 5, no. 1. Art. 017139. P. 1–9. doi: 10.1063/1.4906984.
13. Multi-carrier chaos shift keying: System design and performance analysis / H. Yang, W. K. S. Tang, G. Chen, G.-P. Jiang // *IEEE Trans. on Circuits and Syst. I: Regular Papers*. 2017. Vol. 64, no. 8. P. 2182–2194. doi: 10.1109/TCSI.2017.2685344.
14. An interpolated frequency-hopping spread-spectrum transceiver / N. M. Filiol, C. Plett, T. A. D. Riley, M. A. Copeland // *IEEE Trans. on Circuits and Syst. II: Analog and Digital Signal Proc.* 2002. Vol. 45, no. 1. P. 3–12. doi: 10.1109/82.659452.
15. Yen D. C., Chou D. C., Tarn J. M. Applications and development of spread spectrum technology // *Technol. in Society*. 2000. Vol. 22, no. 4. P. 525–535. doi: 10.1016/S0160-791X(00)00025-7.
16. Hybrid DS/FFH spread-spectrum: a robust, secure transmission technique for communication in harsh environments / M. M. Olama, Xiao Ma, T. P. Kuruganti, S. F. Smith, S. M. Djouadi // *2011-MILCOM 2011 Military Communications Conf.* Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011. P. 2136–2141. doi: 10.1109/MILCOM.2011.6127636.
17. Noreen U., Bounceur A., Clavier L. A study of Lo-Ra low power and wide area network technology // *2017 Intern. Conf. on Advanced Technol. for Signal and Image Proc. (ATSIP)*. Fez, Morocco: IEEE, 2017. P. 1–6. doi: 10.1109/ATSIP.2017.8075570.
18. A anti-jamming method for satellite navigation system based on multi-objective optimization technique / R. Lang, H. Xiao, Zi Li, L. Yu // *PloS one*. 2017. Vol. 12, no. 7. P. e0180893. doi: 10.1371/journal.pone.0180893.
19. Liu H. BPSK/BOC modulation signal system for GPS satellite navigation signals // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2022. Vol. 2384, no. 1. P. 012023. doi: 10.1088/1742-6596/2384/1/012023.
20. Spread spectrum modulation for acoustic communication in shallow water channel / M. Palmese, G. Bertolotto, A. Percetto, A. Trucco // *Oceans 2007-Europe*. Aberdeen, UK: IEEE, 2007. P. 1–4. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302308.
21. An efficient spread spectrum pulse position modulation scheme for point-to-point underwater acoustic communication / G. Zhang, J. M. Hovem, H. Dong, Sh. Zhou, Sh. Du // *Appl. acoustics*. 2010. Vol. 71, no. 1. P. 11–16. doi: 10.1016/j.apacoust.2009.07.010.
22. Yang Y., Duan M. M-Ary spread spectrum code division multiple access underwater acoustic communication // *3<sup>rd</sup> Workshop on Advanced Research and Technol. in Industry (WARTIA 2017)*. Guilin, China: Atlantis Press, 2017. P. 35–39. doi: 10.2991/wartia-17.2017.7.
23. Spread spectrum underwater acoustic communication based on passive time reversal in time varying channels / Y. Zhou, X. Cao, Y. Wu, F. Tong // *J. Appl. Acoust.* 2015. Vol. 34, no. 6. P. 509–515. doi: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.06.006.
24. Experimental demonstration of underwater acoustic communication using bionic signals / X. Han, J. Yin, P. Du, X. Zhang // *Appl. Acoustics*. 2014. Vol. 78. P. 7–10. doi: 10.1016/j.apacoust.2013.10.009.
25. He C., Zhang Q., Huang J. Passive time reversal communication with cyclic shift keying over underwater acoustic channels // *Appl. Acoustics*. 2015. Vol. 96, no. 4. P. 132–138. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.03.022.
26. Zhang G., Dong H. Experimental demonstration of spread spectrum communication over long range multipath channels // *Appl. acoustics*. 2012. Vol. 73, no. 9. P. 872–876. doi: 10.1016/j.apacoust.2012.03.002.
27. Chaotic direct sequence spread spectrum for secure underwater acoustic communication / X. Shu, J. Wang, H. Wang, X. Yang // *Appl. Acoustics*. 2016. Vol. 104. P. 57–66. doi: 10.1016/j.apacoust.2015.10.015.
28. An underwater acoustic spread-spectrum system using RA coding and band-pass signal acquisition / L. Liu, X. Zhang, Q. Wang, L. Li // *2009 5<sup>th</sup> Intern. Conf. on Wireless Comm., Network. and Mobile Comp.* Beijing, China: IEEE, 2009. P. 1–4. doi: 10.1109/WICOM.2009.5301418.
29. Parsons J. D., Parsons P. J. D. The mobile radio propagation channel. Halsted Press, 1992. 316 p.
30. An optimized selection algorithm via adaptive correlation threshold on integrated chaotic spread-spectrum sequences / L. Sijia, M. Yu-quan, L. Bo, P. Wei-Dong, P. Xin // *2011 Int. Conf. on Wireless Comm. and*

Signal Proc. (WCSP). Nanjing, China: IEEE, 2011. P. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096721.

31. Kurian A. P., Puthusserypady S., Htut S. M. Performance enhancement of DS/CDMA system using chaotic complex spreading sequence // IEEE Trans. on wireless communications. 2005. Vol. 4, no. 3. P. 984–989. doi: 10.1109/TWC.2005.847028.

32. Yu J., Yao Y. D. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms // IEEE Trans. on wireless communications. 2005. Vol. 4, no. 2. P. 390–396. doi: 10.1109/TWC.2004.842948.

33. Lau F. C. M., Tse C. K. Chaos-based digital communication systems. Operating principles, analysis methods and performance evaluation. Verlag, Berlin: Springer, 2003.

34. Corron N. J., Blakely J. N. Chaos in optimal communication waveforms // Proc. of the Royal Soc. A: Math., Phys. and Engin. Sci. 2015. Vol. 471, no. 2180. P. 20150222. doi: 10.1098/rspa.2015.0222.

35. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links / A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I. Fischer, J. Garcia-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, K. Alan Shore // Nature. 2005. Vol. 438, no. 7066. P. 343–346. doi: 10.1038/nature04275.

36. Exact analytical bit error rates for multiple access chaos-based communication systems / W. M. Tam, F. C. M. Lau, C. K. Tse, A. J. Lawrance // IEEE Trans. on Circuits and Syst. II: Express Briefs. IEEE, 2004. Vol. 51, no. 9. P. 473–481. doi: 10.1109/TCSII.2004.832773.

37. Advances in computer science and its applications / H. Y. Jeong, M. S. Obaidat, N. Y. Yen, J. J. Park. Springer Berlin, Heidelberg. CSA 2013. Springer Science & Business Media, 2013. Vol. 279. 749 p. doi: 10.1007/978-3-642-41674-3.

38. Wang Sh., Zhu J., Zhou J. OFDM-based chaotic spread spectrum communications with high bandwidth efficiency // 2012 Intern. Conf. on Control Engin. and Comm. Technol. Shenyang, China: IEEE, 2012. P. 940–943. doi: 10.1109/ICCECT.2012.139.

39. Li D., Bo J. F. Design of the DS-UWB communication system based on Chaotic Variable Spreading Factor // 2011 Seventh Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security. Sanya, China: IEEE, 2011. P. 717–720. doi: 10.1109/CIS.2011.163.

40. A chaotic spread spectrum system for underwater acoustic communication / H. P. Ren, C. Bai, Q. Kong, M. S. Baptista, C. Grebogi // Phys. A: Statist. Mechan. and its Appl. 2017. Vol. 478. P. 77–92. doi: 10.1016/j.physa.2017.02.036.

41. A coherent underwater acoustic communication system based on joint iterative equalization and decoding algorithm / S. Tianyu, Y. Zhaokai, Yu. Li, S. Guiqing, H. Haining, Z. Chunhua // 2010 IEEE Youth Conf. on Inform., Comp. and Telecommun. Beijing: IEEE, 2010. P. 73–76. doi: 10.1109/YCICT.2010.5713048.

42. A chaotic direct sequence spread spectrum communication system in shallow water / L. Lei, F. Xu, Y. Xu, Y. Wu // 2011 Intern. Conf. on Control, Automation and Syst. Engin. (CASE). Singapore: IEEE, 2011. P. 1–4. doi: 10.1109/ICCSE.2011.5997600.

43. Van Walree P., Jenserud T., Song H. Characterization of overspread acoustic communication channels // Proc. of the 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Underwater Acoust. (ECUA 2010). URL: [https://www.researchgate.net/publication/228873817\\_Characterization\\_of\\_overspread\\_acoustic\\_communication\\_channels](https://www.researchgate.net/publication/228873817_Characterization_of_overspread_acoustic_communication_channels) (data obrasheniya: 15.11.2025).

44. Yang T. C. Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water // J. of the Acoust. Soc. of America. 2006. Vol. 120, no. 5. P. 2595–2614.

45. Experimental results of underwater acoustic communication with nonlinear frequency modulation waveform / J. An, H. Ra, C. Youn, K. Kim // Sensors (Basel). 2021. Vol. 21, no. 21. P. 7194. doi: 10.3390/s21217194.

46. Stojanovic M., Beaujean P. J. Acoustic communication. In: Dhanak, M. R., Xiros, N. I. (eds) Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer Handbooks. Springer, Cham. P. 359–386. doi: 10.1007/978-3-319-16649-0\_15.

47. Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication / L. Freitag, M. Stojanovic, S. Singh, M. Johnson // IEEE J. of Oceanic Eng. 2002. Vol. 26, no. 4. P. 586–593. doi: 10.1109/48.972098.

48. Collins T., Atkins Ph. Nonlinear frequency modulation chirps for active sonar // IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. IEEE, 1999. Vol. 146, no. 6. P. 312–316. doi: 10.1049/ip-rsn:19990754.

#### Information about the author

**Haider Kareem Muhsen Alsaeed** – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology of Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, Bldg. E, 347922, Taganrog, Russia.

E-mail: mukhsin@sfsedu.ru

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; принята к публикации после рецензирования 27.02.2026; опубликована онлайн 27.04.2026.

Submitted 16.12.2025; accepted 27.02.2026; published online 27.04.2026.