

АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ НА ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ БАРКЕРА

С.И. Каменев

В статье рассматривается вариант системы звукоподводной связи с использованием фазоманипулированных сигналов в виде 13-позиционной последовательности Баркера. Система разработана в отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН. Обсуждаются результаты модельного эксперимента по совместному применению сигналов на основе последовательностей Баркера с разными несущими частотами. Предложен метод разделения этих сигналов для обеспечения надежной передачи команд управления на подводные аппараты (подводные объекты).

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, звукоподводная связь

Введение

Разработка методов и технических средств передачи информации по гидроакустическому каналу тесно связана с исследованием особенностей распространения акустической энергии в районах функционирования подводных объектов. В первую очередь представляет интерес исследование когерентности и стабильности амплитудно-фазовых характеристик акустических сигналов [2, 4], влияющих на достоверность и скорость передачи информации, а так же на скрытность и имитостойкость систем связи. В работе рассматривается вариант системы звукоподводной связи с использованием сигналов на основе 13-позиционной последовательности Баркера, предназначенный для передачи команд управления на подводные объекты. Система также может быть применена для передачи данных о медленно меняющихся параметрах морской среды с подводных обсерваторий.

Разработка систем звукоподводной связи с применением псевдослучайных сигналов является предметом исследований многих авторов. Так, в работах [1–9] на основе анализа современных достижений в области звукоподводной связи рассматриваются вопросы генерации и обработки сложных широкополосных сигналов и проанализирован опыт применения таких сигналов для передачи цифровой информации в условиях многолучевого распространения.

Современные технические средства, разработанные в отделе технических средств ТОИ ДВО РАН, дали возможность развить подходы к созданию облика звукоподводных систем связи на основе этих сигналов. В частности, это позволило создать высокоскоростную систему звукоподводной связи [1]. Принцип работы этой системы связи основан на разделении во времени лучевой структуры акустического поля с последующим энергетическим суммированием всех пришедших в точку приема лучей.

Системы звукоподводной связи, предназначенные для передачи команд управления на подводные объекты, должны гарантировать большую достоверность, достигающую 99,9% (вероятность искажения менее 0,1%) при передаче одной команды. Иногда при передаче команд предъявляются еще более высокие требования к достоверности (вероятность искажения команды не должна превышать 10^{-6} – 10^{-8}). При этом существенно снижены требования к скорости передачи (время передачи команды может быть значительным – порядка секунд).

Команды в некоторых системах должны обладать свойствами, затрудняющими повторение команд с целью нарушения нормальной работы управления и не поддаваться быстрой расшифровке, обеспечивая, как сказано выше, имитостойкость системы связи.

Другой особенностью систем управления подводными объектами по гидроакустическому каналу

связи является осуществляемый почти всегда пассивный режим работы управляемого объекта для обеспечения скрытности его функционирования. То есть отсутствуют демаскирующие объект запрос на получение команды и подтверждение её получения – квитанция.

Для разрабатываемой системы управления подводными объектами был рассмотрен метод передачи по гидроакустическому каналу специально сформированных опорных сигналов вместе с информационными, в целом составляющие команду управления. Собственно, команда управления определяется в результате взаимно-корреляционной обработки информационных сигналов с опорными.

■ Свойства опорных сигналов

При реализации разрабатываемой системы управления подводными объектами был исследован вариант формирования опорных сигналов на основе многочастотных 13-позиционных сигналов Баркера. Основная последовательность Баркера с 13 символами:

$$\{1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1\},$$

переносится в частотную область с сорока периодами несущей частоты 400 Гц на символ. Автокорреляционная функция такого сигнала имеет уровень боковых лепестков относительно главного, как указано выше, $1/13$. Близкая по параметрам 127-символьная М-последовательность с уровнем боковых лепестков $1/\sqrt{127}$ имеет четыре периода несущей частоты на символ. Большое число периодов несущей частоты на символ, реализованное в предлагае-

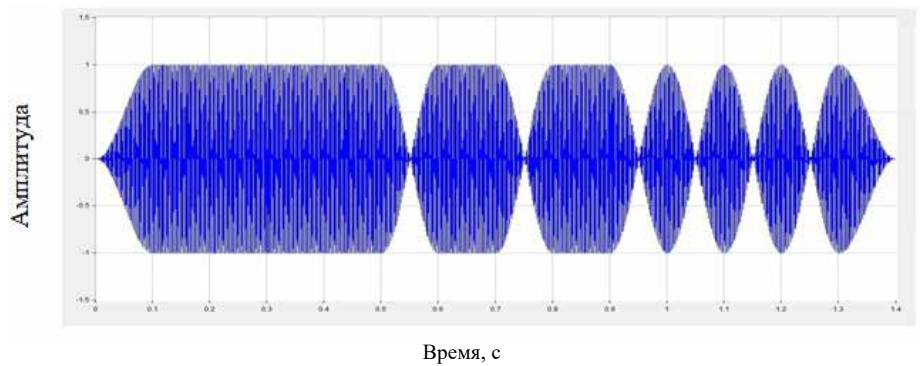


Рис. 1. Модифицированный 13-позиционный сигнал Баркера

мой методике, позволяет применить к сигналу сглаживающую функцию $1+\cos(x)$, заменяющую скачки фазы на $\pi/2$ в начале и конце сигнала, и на π – между символами разных знаков – плавными переходами. Такая модификация сигнала показана на рис. 1 для несущей частоты 400 Гц.

На рис. 2 представлен амплитудный спектр модифицированного 13-позиционного сигнала Баркера с сорока периодами несущей частоты 400 Гц на символ. Видно, что основная энергия сигнала лежит в диапазоне частот 390–410 Гц, и, следовательно, имеется возможность размещения в полосе приёмноизлучающей системы нескольких частотных составляющих. На данном этапе исследований при излучении, приёме и корреляционной обработке использовались сигналы Баркера трёх частот: 400, 380 и 420 Гц с длинами символов 40, 38 и 42 периода несущих частот соответственно. При этом длительность всех трёх сигналов одинаковая и составляет 1.4 с.

Корреляционные свойства отдельных сигналов Баркера в их трёхчастотной композиции иллюстрирует рис. 3, где представлена нормированная автокорреляционная функция сигнала с несущей частотой 400 Гц. Уровень боковых лепестков, как и до модификации, не превышает $1/13$, ширина главного лепестка также определяется длительностью одного символа сигнала и составляет 0.2 с.

Расчёты взаимно-корреляционных функций сигналов Баркера в трёхчастотной композиции представлены на рис. 4. Уровни этих функций, нормированных на максимум автокорреляционной, на 2–3 порядка ниже для близко расположенных частот (рис. 4, а, в) и на 3–4 порядка – для отдалённых (рис. 4, б), что позволяет считать отдельные компоненты многочастотного сигнала Баркера квазиортогональными. Это открывает ши-

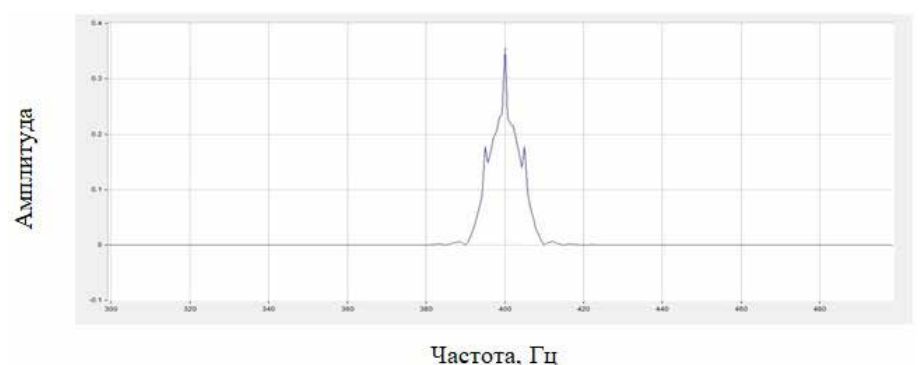


Рис. 2. Амплитудный спектр модифицированного сигнала Баркера (400 Гц)

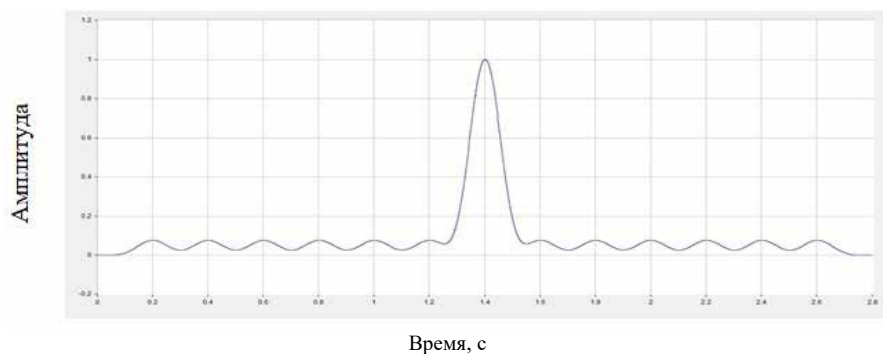


Рис. 3. Автокорреляционная функция модифицированного сигнала Баркера

дачи команд управления со скоростью 2.04 бод.

На первом этапе из сигналов трёх частот формируются триады 380–400–420 Гц с заданными уровнями для каждой частоты, как это показано в табл. 1.

Таблица 1. Частотные триады

№ п/п	Триада 380-400-420 Гц	Уровни
1	{000}	1,1,1
2	{001}	1,1,0
3	{010}	1,0,1
4	{011}	1,0,0
5	{100}	0,1,1
6	{101}	0,1,0
7	{110}	0,0,1
8	{111}	0,0,0

а

б

в

Байты символов ASCII дополняются девятым битом для контроля чётности. Каждые три бита последовательно кодируются тремя опорными частотами, причём битам «0» ставится в соответствие уровень 1, а битам «1» – нулевой, так как в большинстве используемых символов биты «0» являются ведущими. Применяемая инверсия символа позволяет более надёжно распознавать начало символа.

Далее формируется собственно фрейм, состоящий последовательно из опорного сигнала 400 Гц, контрольной триады {000} (суммы сигналов трёх частот), опорного сигнала 380 Гц, опорного сигнала 420 Гц и кодированного цуга алфавитно-цифровых символов.

Важным элементом фрейма является временная пауза между компонентами, определяемая условиями распространения в гидроакустическом канале, что приводит к затягиванию сигналов. Собственно длина фрейма ограничена временной когерентностью [2].

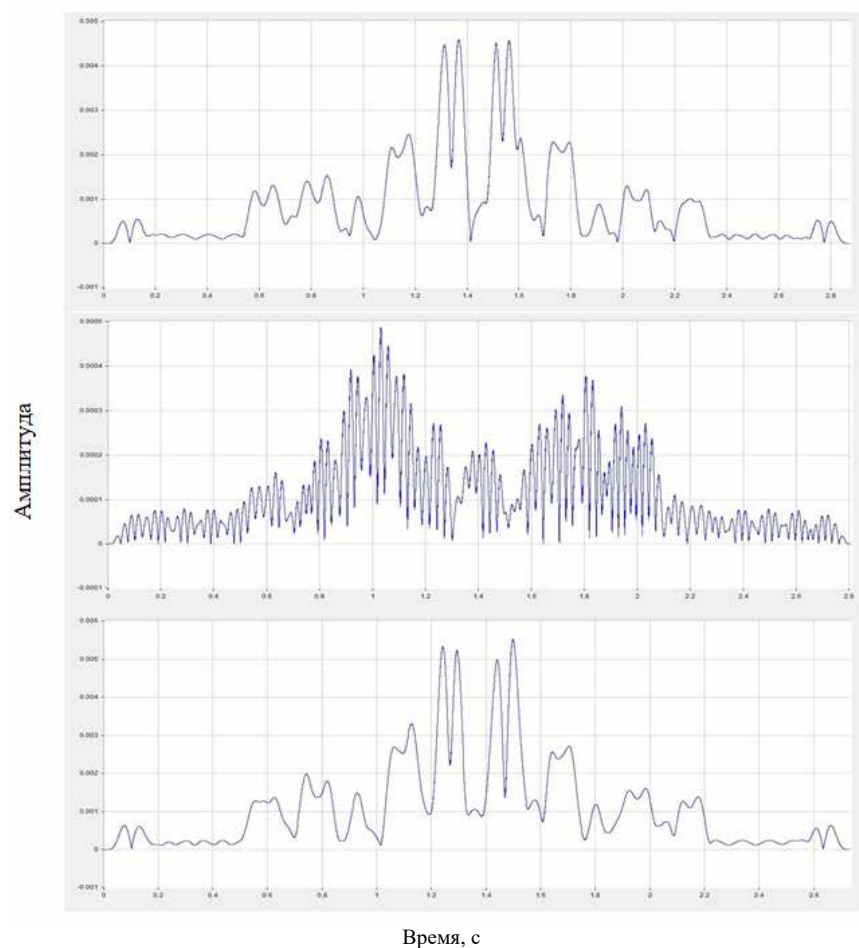


Рис. 4. Взаимно-корреляционные функции опорных сигналов, нормированные на максимум автокорреляционной функции: 380–400 Гц (а); 380–420 Гц (б); 400–420 Гц (в)

рокие возможности по использованию таких сигналов в формировании сигнальных фреймов, безискажённого излучения фреймов и надежного выделения информации при приёме.

■ Формирование сигнальных фреймов

Частотные и временные параметры используемого многочастотного сигнала Баркера позволяют сформировать сигнальный фрейм для пере-

Отметим, что данный фрейм сформирован для передачи 256 команд – по числу символов в таблице ASCII.

При ухудшении помеховой обстановки в канале представляется возможным повышение надёжности передачи команд за счёт снижения битовой скорости. На рис. 5 представлены фрейм, сформированный триадами частот из табл. 1, а именно {010} и {101}, и корреляционные отклики фрейма.

Кодирование информации осуществляется путём сопоставления данных триад нулевому и единичному биту соответственно. То есть один информацион-

ный бит заменяется тремя битами из триад, скорость передачи при этом снижается до 0.7 бод.

Данный фрейм состоит последовательно из опорных сигналов с несущими частотами 400, 380, 420 Гц и кодированной информационной последовательности: в данном случае (рис. 5, а) восьми бит {01010000} символа «Р» из таблицы ASCII.

На рис. 5, б, в и г приведены корреляционные отклики фрейма на опорные сигналы 380, 400 и 420 Гц соответственно. Первые отклики на рисунках относятся собственно к опорным сигналам и демонстрируют квазиортогональность этих сигналов. По следующим пикам взаимно-корреляционных функций

восстанавливается переданный восьмибитовый символ.

В реальном эксперименте могут быть приняты отличные от триад {010} и {101} триады. Решение в этом случае рекомендуется принимать в соответствии с табл. 2. Как видно из таблицы, принятые триады отличаются от переданных триад максимум на один бит в одной из позиций.

Таблица 2. Соответствие триад

Переданная триада	Принятая триада
010	000
	010
	011
	110
101	001
	100
	101
	111

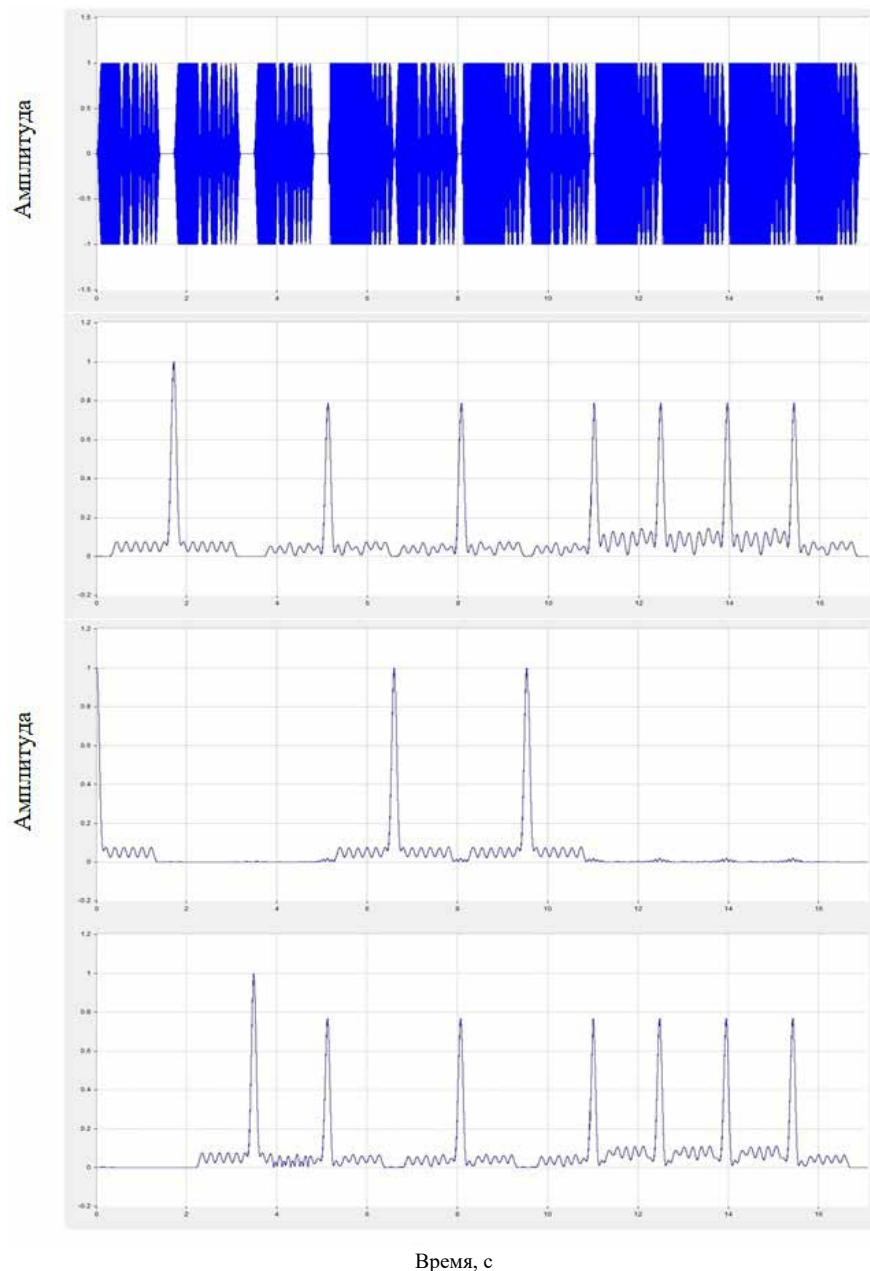


Рис. 5. Сигнальный фрейм, состоящий из трёх опорных сигналов 400, 380, 420 Гц и кодированной триадами частот {010}, {101} последовательности {01010000} (а); корреляционные отклики фрейма на опорные сигналы 380 Гц (б), 400 Гц (в) и 420 Гц (г)

Заключение

Модификация исходного сигнала Баркера позволила сделать его многочастотным. Количество квази-ортогональных частотных компонент в сигнале определяется полосой пропускания приёмноизлучающих трактов и длительностью сигнала. Скорость передачи информации прямо пропорциональна числу опорных сигналов.

Описанные в разделе фреймы предполагают передачу 256 команд управления – по числу символов

в таблице ASCII. При ограничении числа команд (например, восемь) открывается возможность повышения надежности передачи в результате использования технологий помехоустойчивого кодирования, репетиционной техники и т.п.

Во фреймах использованы два уровня сигналов: 0 и 1. Скорость передачи команд может быть увеличена как за счёт частотного уплотнения, так и за счёт увеличения амплитудно-фазовых уровней сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
2. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 374–380.
3. Захаров Ю.В., Коданев В.П. Экспериментальное исследование акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Акустический журнал. 1994. Т. 40, № 5. С. 799–808.
4. Каменев С.И. Экспериментальные исследования характеристик сложных фазоманипулированных акустических сигналов на стационарных трассах различной протяженности // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 46–52.
5. Каменев С.И. Виртуальная гидроакустическая система обращения времени // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 47–52.
6. Чепурин Ю.А., Гаврилов А.Н. Передача данных по подводному акустическому каналу: анализ данных эксперимента АСОУС // Доклады 10-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2004. С. 222–225.
7. Satipovic J.A. Performance limitation in underwater acoustic telemetry // IEEE J. Oceanic Engineering. 1990. Vol. OE-15, No. 3. P. 205–216.
8. Безответных В.В., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н., Буренин А.В. Система звукоподводной связи с использованием сложных фазоманипулированных сигналов и обращения времени // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 58–63.
9. Каменев С.И. Сигналы с улучшенными характеристиками на основе последовательностей Баркера для применения в акустических системах // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 63–68.

Справка об авторе

КАМЕНЕВ Сергей Иванович, с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: г. Владивосток, ул.Балтийская, 43

Область научных интересов: физическая акустика, излучение и приём звука, звукоподводная связь, навигация подводных объектов, цифровая обработка сигналов

Тел.: (423) 2 31-16-31

E-mail: kamenev@poi.dvo.ru

Для цитирования:

Каменев С.И. АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ НА ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ БАРКЕРА // Подводные исследования и робототехника. 2025. №. 1 (51). С. 84–89. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_08. EDN: VIFWNA.



DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_08

ACOUSTIC CONTROL COMMAND TRANSMISSION SYSTEM ON UNDERWATER VEHICLES USING BARKER SEQUENCES

S.I. Kamenev

The article considers a variant of the underwater communication system using phase-manipulated signals in the form of a 13-position Barker sequence. The system was developed in the Department of Technical Means of Ocean Research at the Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The results of a model experiment on the joint application of signals based on Barker sequences with different carrier frequencies are discussed. A method of separating these signals is proposed to ensure reliable transmission of control commands to underwater vehicles (underwater objects).

Keywords: hydroacoustics, pseudorandom signals, underwater communication.

References

1. Akulichev V.A., Kamenev S.I., Morgunov Ju.N. Primenenie slozhnykh akusticheskikh signalov v sistemah svyazi i upravleniya podvodnymi ob'ektami // Doklady AN. 2009. Vol. 426, No. 6. P. 821–823. [In Russ.]
2. Bezotvetnyh V.V., Burenin A.V., Morgunov Ju.N., Polovinka Ju.A. Jeksperimental'nye issledovaniya osobennostej rasprostraneniya impul'snykh signalov iz shel'fa v glubokoe more // Akusticheskij zhurnal. 2009. Vol. 55, No. 3. P. 374–380. [In Russ.]
3. Zaharov Ju.V., Kodanov V.P. Jeksperimental'noe issledovanie akusticheskoy sistemy peredachi informatsii s shumopodobnymi signalami // Akusticheskij zhurnal. 1994. Vol. 40, No. 5. P. 799–808. [In Russ.]
4. Kamenev S.I. Jeksperimental'nye issledovaniya harakteristik slozhnykh fazomanipulirovannykh akusticheskikh signalov na stacionarnykh trassah razlichnoj protjazhennosti // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2007. No. 2(4). P. 46–52. [In Russ.]
5. Kamenev S.I. Virtual'naja gidroakusticheskaja sistema obrashheniya vremeni // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2010. No. 1(9). P. 47–52. [In Russ.]
6. Chepurin Ju.A., Gavrilov A.N. Peredacha dannykh po podvodnomu akusticheskomu kanalu: analiz dannykh jeksperimenta ACOUS // Doklady 10-j shkoly-seminara akad. L.M. Brehovskih. M.: GEOS, 2004. P. 222–225. [In Russ.]
7. Catipovic J.A. Performance limitation in underwater acoustic telemetry // IEEE J. Oceanic Engineering. 1990. V. OE-15, No. 3. P. 205–216.
8. Bezotvetnyh V.V., Kamenev S.I., Morgunov Ju.N., Burenin A.V. Sistema zvukopodvodnoj svyazi s ispol'zovaniem slozhnykh fazomanipulirovannykh signalov i obrashheniya vremeni // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2014. No. 2 (18). P. 58–63. [In Russ.]
9. Kamenev S.I. Signaly s uluchshennymi harakteristikami na osnove posledovatel'nostej Barkera dlja primeneniya v akusticheskikh sistemah // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2014. No. 2 (18). P. 63–68. [In Russ.]

Recommended citation:

Kamenev S.I. ACOUSTIC CONTROL COMMAND TRANSMISSION SYSTEM ON UNDERWATER VEHICLES USING BARKER SEQUENCES. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 1 (51). P. 84–89. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_08. EDN: VIFWNA.

About the authors

KAMENEV Sergey Ivanovich, Senior Researcher Laboratory of Acoustic Tomography
POI FEB RAS
Address: Russia, 690041 Vladivostok, Baltiyskaya str., 43
Area of research interests: Physical acoustics, Digital signal processing, Underwater navigation, Underwater sound communication
Phone: (423-2)311-613. **E-mail:** kamenev@poi.dvo.ru

