Физические поля корабля и океана

Научная статья
УДК 681.2.083
https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/58-64

С.В. Шостак, А.В. Бенгард

ШОСТАК СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, servash@mail.ru
БЕНГАРД АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – аспирант, bengard.av@dvfu.ru✉
Департамент электроники, телекоммуникации
и приборостроения Политехнического института
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Решение задачи обнаружения и оценки дальности и радиальной скорости малогабаритного подводного объекта на основе дискретно-кодированной последовательности сигналов с линейно-частотной модуляцией

Аннотация: В гидроакустике важное значение имеют гидролокация и оценка радиальной скорости подводного объекта. Сфера их применения различна – от оценки скорости морских млекопитающих до охраны морских инженерных сооружений. Проблема оценки дальности и радиальной скорости в гидроакустике актуальна и по сей день, поэтому в данной статье описан метод, с помощью которого можно определить данные параметры подводного объекта.

Ключевые слова: эффект Доплера, комплексное сопряжение, дискретно-кодированный сигнал, радиальная скорость

Для цитирования: Шостак С.В., Бенгард А.В. Решение задачи обнаружения и оценки дальности и радиальной скорости малогабаритного подводного объекта на основе дискретно-кодированной последовательности сигналов с линейно-частотной модуляцией // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1(50). С. 58–64. https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/58-64

Введение

В гидроакустических системах (ГАС) наблюдения за подводной обстановкой анализ состояния среды проводится, как правило, благодаря излучению и приему отраженных от целей импульсных сигналов. Выбор формы зондирующего сигнала и его параметров (синтез сигнала) производится в зависимости от решаемых ГАС задач. Основными составляющими таких задач являются [3–5]:

1) обнаружение цели;
2) оценка дальности до цели;
3) оценка радиальной скорости цели.

Для решения этих задач зондирующий сигнал должен распространяться в гидроакустическом канале с возможно меньшими потерями, хорошо отражаться от цели и быть достаточно энергетичным для обеспечения характеристик обнаружения на фоне шумов и помех [4]. Такими сигналами могут быть сложные широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы), имеющие большую длительность и широкую полосу частот. ЛЧМ-сигнал с растущей мгновенной частотой описывается выражением

$$\exp\left[j2\pi\left(f_0 t + 0.5bt^2 \right)\right]. \quad (1)$$

Статья: поступила: 27.01.2022; рецензия: 09.02.2022; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

где f_0 – начальная частота сигнала, t – время, $b = F/T$ – коэффициент девиации, F – полоса сигнала, T – длительность сигнала. Представим график зависимости мгновенной частоты такого сигнала от времени (рис. 1).

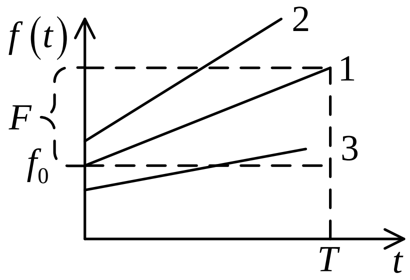

Рис. 1. Мгновенная частота ЛЧМ-сигнала:
1 – зондирующего; 2 и 3 – эхо-сигналов, деформированных эффектом Доплера

Обработка подобных сигналов проводится методом корреляционного сравнения эхо-сигнала с копией зондирующего, форма которого должна быть изменена в соответствии с ожидаемой доплеровской трансформацией масштаба времени [3, 5]. Особенность такой трансформации для ЛЧМ-сигналов связана с изменением коэффициента девиации, то есть наклона мгновенной частоты, представленной на рис. 1, где прямая 2 соответствует приближающейся цели, прямая 3 – удаляющейся цели.

Создание банка копий зондирующего сигнала в случае его узкополосности, когда влияние эффекта Доплера описывается сдвигом частоты, не вызывает больших затрат. В случае широкополосных ЛЧМ-сигналов изменение частотной оси происходит более сложным образом, как показано на рис. 1. Поэтому прибегают к определенным приближениям, что вызывает снижение отношения сигнал/шум [5].

Метод обработки

Рассмотрим способ обработки сложного широкополосного ЛЧМ-сигнала на основе гармонического разложения с возможностью оценки радиальной скорости цели при использовании одного импульса зондирующего сигнала.

Сформируем последовательность из двух ЛЧМ-сигналов:

$$s(t) = \left[s_1(t) s_2(t) \right]. \tag{2}$$

В выражении (2)

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \exp\left[j2\pi\left(f_1 t + 0.5bt^2 \right) \right] \\ s_2(t) &= \exp\left[j2\pi\left(f_2 t + 0.5bt^2 \right) \right], \end{aligned} \tag{3}$$

где t – время, f_1 и f_2 – начальные частоты (рис. 2).

Представим мгновенную частоту сигнала $s(t)$ (рис. 2).

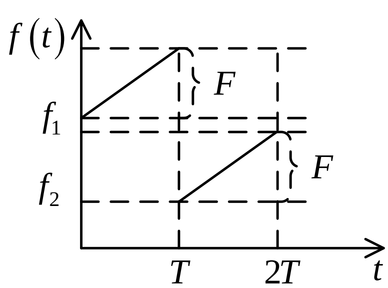

Рис. 2. Мгновенная частота сигнала $s(t)$

Следует заметить, что при перемножении $s_1(t)$ на комплексно-сопряженный $s_2(t)$ получим

$$z(t)=s_1(t)s_2^*(t)=\exp\left[j2\pi\left(f_1t+0.5bt^2\right)\right]\exp\left[-j2\pi\left(f_2t+0.5bt^2\right)\right]=\exp\left(j2\pi\left(f_1-f_2\right)t\right), \quad (4)$$

где $*$ – комплексное сопряжение. Мгновенная частота полученного сигнала постоянна и равна $f_c=f_1-f_2$.

Как известно, при движении цели происходит доплеровская трансформация временного масштаба по закону $t\to\alpha t$, где $\alpha=1+\frac{2V_r}{c}$ – доплеровский параметр, V_r – радиальная скорость цели, c – скорость звука в воде. С учетом изменения масштаба времени перепишем выражение (2):

$$s(\alpha t)=\left[s_1(\alpha t)s_2(\alpha t)\right]=\left[\exp\left[j2\pi\left(f_1\alpha t+0.5b\alpha^2t^2\right)\right]\exp\left[j2\pi\left(f_2\alpha t+0.5b\alpha^2t^2\right)\right]\right]. \quad (5)$$

Мгновенные частоты для $s_1(\alpha t)$ и $s_2(\alpha t)$ имеют вид $\left(f_1+\alpha^2bt\right)$ и $\left(f_2+\alpha^2bt\right)$ соответственно. Как видно, коэффициент девиации изменился в α^2 раз.

Предположим, что за время длительности посылки $2T$ параметр α практически не меняется. В этом случае, выполняя операцию аналогично (4), имеем

$$z(\alpha t)=s_1(\alpha t)s_2^*(\alpha t)=\exp\left(j2\pi\left(f_c\alpha t\right)\right)=\exp\left[j2\pi f_c\left(1+\frac{2V_r}{c}\right)t\right]=\exp\left[j2\pi\left(f_c+\frac{2V_r}{c}f_c\right)t\right]. \quad (6)$$

Как и ранее, мгновенная частота результирующего сигнала постоянна и равна $f_c+\frac{2V_r}{c}f_c$, где составляющая $\frac{2V_r}{c}f_c$ определяет доплеровский сдвиг.

Представим совмещенные мгновенные частоты сигналов $s_1(\alpha t)$ и $s_2(\alpha t)$ (рис. 3).

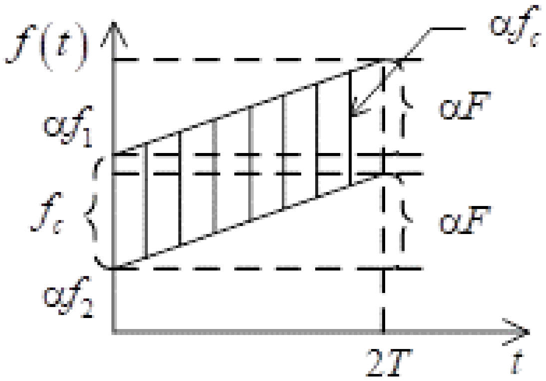

Рис. 3. Мгновенная частота сигнала $z(\alpha t)$

Таким образом, задача обработки сигналов $z(t)$ и $z(\alpha t)$ сводится к обнаружению гармонического сигнала и оценке его частоты, которая имеет постоянное значение. Как известно, подобные задачи решаются методами спектрального анализа.

Рассмотрим возможную реализацию представленного способа обработки последовательности ЛЧМ-сигналов. Считаем, что обработка проводится в дискретном виде. Для этого случая сигналы имеют вид

$$s(\alpha n)=\left[s_1(\alpha n)s_2(\alpha n)\right]=\left[\exp\left[j\frac{2\pi}{N}\left(\alpha K_1n+0.5b\alpha^2n^2\right)\right]\exp\left[j\frac{2\pi}{N}\left(\alpha K_2n+0.5b\alpha^2n^2\right)\right]\right], \quad (7)$$

где n – номер отсчета по временной оси;

N – число отсчетов для $s_1(\alpha n)$ и $s_2(\alpha n)$ – аналог длительности импульса T;

K_1 – номер отсчета для f_1;

K_2 – номер отсчета для f_2.

Представим структурную схему процессора обработки (рис. 4).

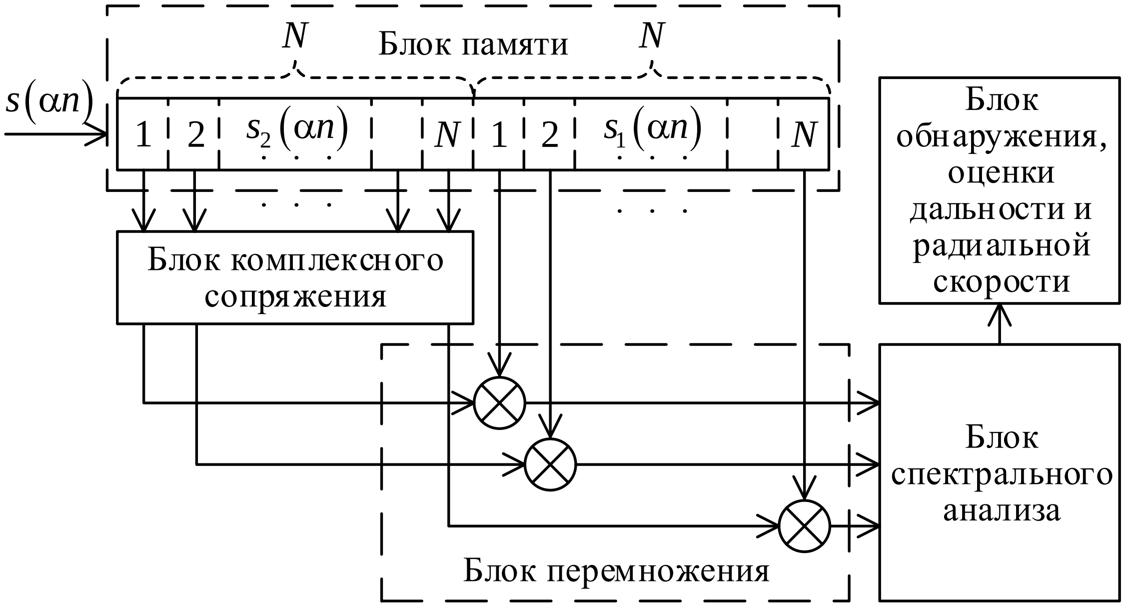

Рис. 4. Структурная схема процессора обработки последовательности ЛЧМ-сигналов

Процессор содержит блок памяти на $2N$ ячеек, блок комплексного сопряжения, блок перемножения, блок спектрального анализа и блок обнаружения сигнала, оценки дальности и радиальной скорости.

В блоке комплексного сопряжения сигнал $s_2(\alpha n)$ преобразуется к комплексно-сопряженному виду:

$$s_2^*(\alpha n) = \exp\left[-j\frac{2\pi}{N}\left(\alpha K_2 n + 0.5 b\alpha^2 n^2\right)\right]. \tag{8}$$

Далее в блоке перемножения сигналы $s_1(\alpha n)$ и $s_2^*(\alpha n)$ перемножаются, в результате чего получаем

$$z(\alpha n) = s_1(\alpha n) s_2^*(\alpha n) = \exp\left(j\frac{2\pi}{N}K_c \alpha n\right), \tag{9}$$

где $K_c = K_1 - K_2$.

В блоке спектрального анализа вычисляется спектральная плотность мощности $z(\alpha n)$ периодограммным методом [5]:

$$z(k) = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} z(\alpha n)\exp\left(-j\frac{2\pi}{N}Kn\right)\right|^2 = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1}\exp\left[-j\frac{2\pi}{N}(K - \alpha K_c)n\right]\right|^2. \tag{10}$$

$z(k)$ имеет максимальное значение при $K = \alpha K_c = \left(1 + \frac{2V_r}{c}\right)K_c$, откуда определяется радиальная скорость цели:

$$V_r = \frac{c}{2}\left(\frac{K}{K_c} - 1\right). \tag{11}$$

Дальность до цели определяется по задержке появления максимума $z(k)$ относительно момента излучения. Обнаружение сигнала, оценка дальности и радиальной скорости производятся в соответствующем блоке.

Проведем моделирование представленного способа с частотой дискретизации 10 кГц для следующих параметров ЛЧМ-сигналов: начальные частоты f_1 = 4 кГц и f_2 = 3 кГц; длительность и полосу частот установим одинаковыми для обоих сигналов – F = 500 Гц, T = 1 с.

Сформированные зондирующие сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ излучим в направлении цели. Для имитации движения цели возьмем несколько значений радиальной скорости: V_r = 0 (цель неподвижна), – 5 м/с (цель удаляется), 10 м/с (цель приближается). Отраженные от цели сигналы $s_1(\alpha n)$ и комплексно-сопряженный $s_2^*(\alpha n)$ пропустим через блок перемножения и на выходе блока спектрального анализа получим гармонический сигнал $z(\alpha n)$, мгновенная частота которого будет соответствовать радиальной скорости цели (рис. 5).

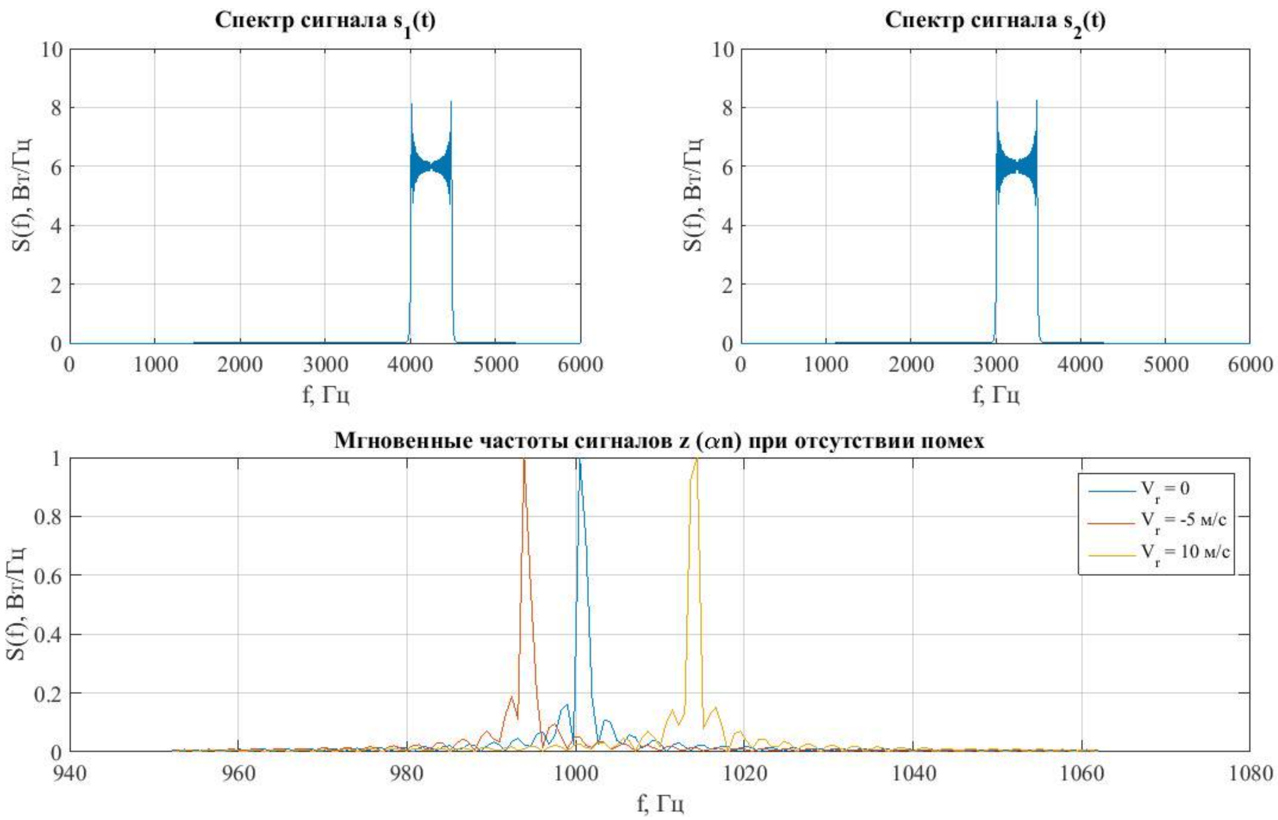

Рис. 5. Спектры излученных сигналов $s_1(t)$, $s_2(t)$ и мгновенные частоты сигналов $z(\alpha n)$ при отсутствии помех

Для иллюстрации помехоустойчивости предлагаемого способа добавим к сигналам $s_1(\alpha t)$ и $s_2(\alpha t)$ белый некоррелированный гауссовский шум мощностью –10 дБ (что соответствует отношению звуковых давлений полезного сигнала и шума в 3,16 раза), имитируя помеху морской среды, и повторим операцию нахождения сигнала $z(\alpha n)$ (рис. 6).

Для наглядности на рисунках 5 и 6 представлены нормированные уровни спектральной плотности сигналов $z(\alpha n)$. Видно, что используемый при спектральном анализе метод периодограмм позволяет оценивать радиальную скорость цели при наличии достаточно сильного шума –10 дБ.

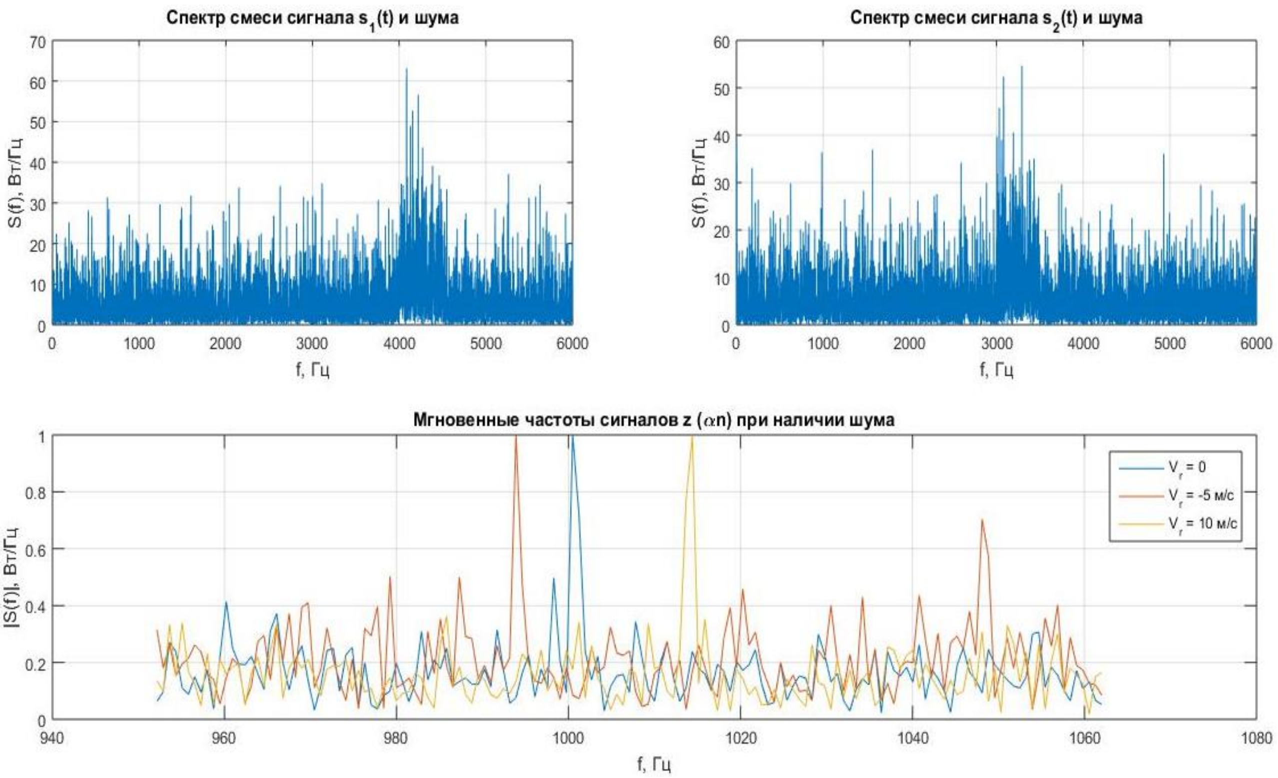

Рис. 6. Спектры излученных сигналов $s_1(t)$, $s_2(t)$ и мгновенные частоты сигналов $z(\alpha n)$ с предполагаемой помехой морской среды

Заключение

В представленной работе обоснован метод обработки последовательности из двух ЛЧМ-сигналов, инвариантный относительно эффекта Доплера. Показано, что в ходе применения ЛЧМ-сигналов с одинаковыми коэффициентами девиации, но разными начальными частотами при их смешивании образуется гармонический сигнал с постоянной частотой, сдвиг которой зависит от доплеровского параметра. В результате обработка сигналов свелась к выделению гармонической составляющей и оценке ее частоты. Такая задача решается методами спектрального анализа на основе быстрых алгоритмов Фурье, что позволяет не вводить приближений, связанных с потерей в отношении сигнал/шум, как описано в [5].

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1990. 584 с.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Ленинград: Судостроение, 1972. 348 с.
3. Abraham D.A. Underwater acoustic signal processing. ASA Press, Springer, 2019. 834 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92983-5
4. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M., Schimlal H. Computational ocean acoustics. Springer New York, Dordrecht Heidelderg, London, 2011. 795 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8678-8
5. Tianzeng X., Lufen X. Digital Underwater Acoustic Communications. China Ocean Press, Elsevier Inc., 2017. 290 p. DOI: 10.1016/C2014-0-00624-7

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 1/50
Physical Fields of Ship, Ocean and Atmosphere www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article
https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/58-64

Shostak S., Bengard A.

SERGEY V. SHOSTAK, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
servash@mail.ru
ALEXANDER V. BENGARD, Postgraduate Student, bengard.av@dvfu.ru
Polytechnic Institute
Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia

Small-sized underwater object's detection and its radial velocity and range estimation based on discrete-coded frequency-modulated signal sequence

Abstract: Hydrolocation and underwater object's detection and radial velocity estimation play an important role in hydro-acoustics. Their area of application varies from marine mammals' velocity estimation to marine engineering structures' protection. This article describes a processing method of small-sized underwater objects' detection and velocity estimation based on discrete-coded frequency-modulated signal sequence. Nowadays, range and radial velocity estimation problem is still relevant, so this article describes the method used to determine these parameters of an underwater object.
Keywords: Doppler effect, complex conjugation, discrete-coded signal, radial velocity

For citation: Shostak S., Bengard A. Small-sized underwater object's detection and its radial velocity and range estimation based on discrete-coded frequency-modulated signal sequence. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(50):58-64. (In Russ.). https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/58-64

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Marple S.L.Jr. Digital spectral analysis and its applipation. Moscow, Mir, 1990. 584 p.
2. Shenderov E.L. Hydroacoustics wave tasks. Leningrad, Sudostroenie, 1972. 348 p.
3. Abraham D.A. Underwater acoustic signal processing. ASA Press, Springer, 2019. 834 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92983-5
4. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M., Schimlal H. Computational ocean acoustics. Springer New York, Dordrecht Heidelderg, London, 2011. 795 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8678-8
5. Tianzeng X., Lufen X. Digital Underwater Acoustic Communications. China Ocean Press, Elsevier Inc., 2017. 290 p. DOI: 10.1016/C2014-0-00624-7