

Гидравлика и инженерная гидрология

Научная статья

УДК 681.2.083

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/90-94>

С.В. Шостак, А.В. Бенгард, Ю.В. Шпак

ШОСТАК СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, servash@mail.ru

БЕНГАРД АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ – аспирант, bengard.av@dvfu.ru

ШПАК ЮЛИЯ ВАДИМОВНА – аспирант, shpak.yv@dvfu.ru

Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Способ обработки сложного широкополосного сигнала с параболической частотной модуляцией

Аннотация. В данной статье описан способ обработки сигнала, состоящего из последовательности двух сигналов с параболической частотной модуляцией. Проведены математические расчеты обработки такого сигнала, а также выполнено математическое моделирование в среде MATLAB при двух условиях: при наличии в водоеме подвижной и при наличии неподвижной цели. Также предоставлен способ реализации метода обработки синтезированного сигнала в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: эффект Доплера, радиальная скорость, параболическая частотная модуляция, широкополосный сигнал

Для цитирования: Шостак С.В., Бенгард А.В., Шпак Ю.В. Способ обработки сложного широкополосного сигнала с параболической частотной модуляцией // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 3(52). С. 90–94.

Введение

В гидроакустике широко используются широкополосные сигналы. Они менее подвержены воздействию шумов и, как правило, обрабатываются корреляционными фильтрами. Но для оценки скорости подводного объекта необходим банк фильтров, каждый из которых настраивается на конкретный доплеровский параметр, что на практике усложняет обработку сигнала. Поэтому цель данной работы – разработать такой метод обработки, который позволил бы обойтись без банка фильтров.

Метод обработки

Рассмотрим двухканальный способ обработки сложного широкополосного сигнала с параболической частотной модуляцией, который на одном канале позволяет обнаруживать и оценивать дальность, а на втором канале – оценивать радиальную скорость, причем без использования банка фильтров. Для этого синтезируем сигнал, состоящий из двух подымпульсов:

- с возрастающей мгновенной частотой, которая описывается функцией

$$f_1(t) = f_0 t + \frac{bt^3}{3}, \quad (1)$$

- с убывающей мгновенной частотой вида

$$f_2(t) = f_0 t - \frac{bt^3}{3}, \quad (2)$$

где $b = \frac{F}{T^2}$ – коэффициент девиации, F – полоса сигнала, T – длительность сигнала, f_0 – начальная частота.

Сигнал с возрастающей мгновенной частотой имеет вид:

$$s_1(t) = e^{i2\pi\left(f_0 t + \frac{bt^3}{3}\right)}, \quad (3)$$

в то время как сигнал с убывающей мгновенной частотой имеет следующий вид:

$$s_2(t) = e^{i2\pi\left(f_0 t - \frac{bt^3}{3}\right)}, \quad (4)$$

Из этих сигналов составим последовательность

$$s(t) = [s_1(t) s_2(t)]. \quad (5)$$

Изобразим на рис. 1 график зависимости мгновенной частоты синтезированного сигнала от времени.

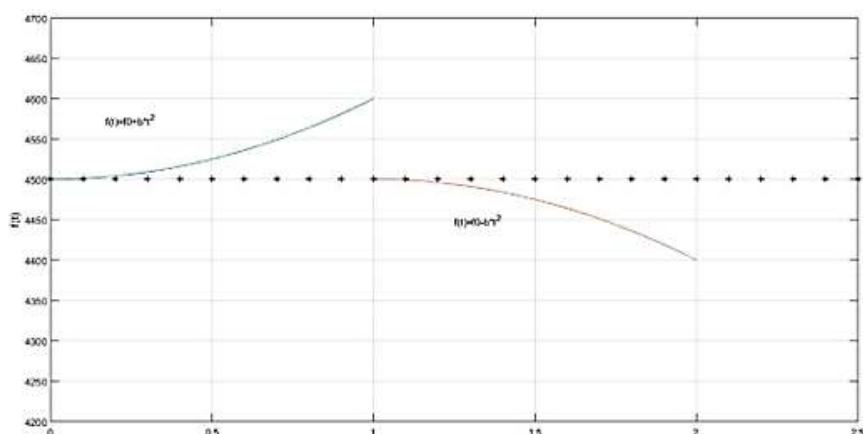


Рис. 1. График зависимости мгновенной частоты синтезированного сигнала от времени при начальной частоте $f_0 = 4500$ Гц, полосе $F = 100$ Гц и длительности сигнала $T = 1$ с

Эффект Доплера заключается в сжатии или расширении излучаемого сигнала после отражения от подвижной цели. Отраженный от подводного объекта сигнал сжимается или растягивается в α раз, где

$$\alpha = 1 \pm \frac{2v_{ц}}{c} \quad (6)$$

при $c = 1500$ м/с (c – скорость звука в воде, $v_{ц}$ – скорость цели).

После отражения сигналов от движущегося объекта они приобретут следующий вид:

$$s_1(\alpha t) = e^{i2\pi\left(f_0 \alpha t + \frac{b\alpha^3 t^3}{3}\right)}, \quad (7)$$

$$s_2(\alpha t) = e^{i2\pi\left(f_0 \alpha t - \frac{b\alpha^3 t^3}{3}\right)}. \quad (8)$$

Рассмотрим одно из свойств сигналов $s_1(\alpha t)$ и $s_2(\alpha t)$, для чего проведем операцию смешивания (произведения) этих сигналов.

$$\begin{aligned} z(\alpha t) &= s_1(\alpha t) s_2(\alpha t) = e^{i2\pi\left(f_0 \alpha t + \frac{b\alpha^3 t^3}{3}\right)} e^{i2\pi\left(f_0 \alpha t - \frac{b\alpha^3 t^3}{3}\right)} = \\ &= e^{i2\pi\left(f_0 \alpha t + \frac{b\alpha^3 t^3}{3} + f_0 \alpha t - \frac{b\alpha^3 t^3}{3}\right)} = e^{i2\pi(2f_0 \alpha t)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что полученный сигнал имеет постоянную мгновенную частоту $f = 2\alpha f_0$, что делает его удобным для обработки хорошо известными методами цифровой обработки сигналов (например, методом периодограмм, методом Юла-Уолкера и др.) [4].

Для проверки работоспособности полученных результатов проведено моделирование рассмотренного способа в среде MATLAB. Для этого выбирались $f_0 = 4500$ Гц, полоса $F = 100$ Гц, длительность сигнала $T = 1$ с и частота дискретизации $f_s = 20000$ Гц. Считаем, что имеется две цели: одна из них подвижная, другая перемещается в воде со скоростью $v_{ц} = 6$ м/с. На рис. 2 изображен нормированный модуль спектра отраженного от неподвижной цели сигнала (синий график) и отраженного от движущейся цели при отношении сигнал/помеха $\frac{S}{N} = 3$ дБ. Как видно из графика, для неподвижной цели частота имеет значение $2f_0$, в то время как для движущейся цели максимум находится в значении $f_1 = 2\alpha f_0$. Из частоты f_1 несложно получить значение радиальной скорости $v_{ц}$:

$$f_1 = f_0 \pm \frac{2v_{ц}}{c} f_0, \quad (10)$$

$$v_{ц} = \pm 0,5c \left(\frac{f_1}{f_0} - 1 \right). \quad (11)$$

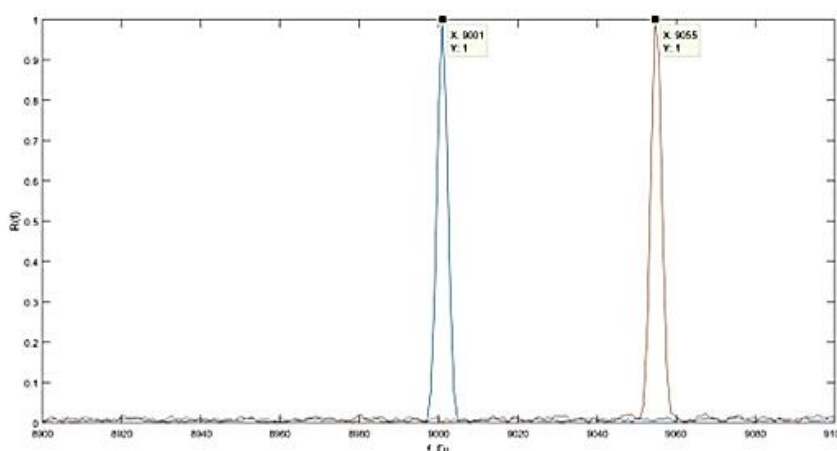


Рис. 2. Нормированный модуль спектра отраженного от неподвижной цели сигнала (синий график) и отраженного от движущейся цели сигнала (оранжевый график) при отношении сигнал/помеха $\frac{S}{N} = 3$ дБ, полученные с помощью метода Юла-Уолкера 100 порядка

Оценка дальности r производится по формуле

$$r = \frac{ct}{2}, \quad (12)$$

где $c = 1500$ м/с – скорость звука в воде, t – время, за которое сигнал проделает путь до подводного объекта и обратно.

Оценим разрешающую способность по скорости для рассмотренного способа. Разрешающую способность по скорости определим из выражения

$$\Delta v = v_1 - v_2. \quad (13)$$

Подставим в (13) выражение (11) для соответствующих скоростей v_1 и v_2 :

$$\Delta v = 0,5c \left(\frac{f_1}{2f_0} - 1 \right) - 0,5c \left(\frac{f_2}{2f_0} - 1 \right) = 0,5c \left(\frac{f_1 - f_2}{2f_0} \right) = \frac{c}{4f_0} \Delta f, \quad (14)$$

где Δf – разрешающая способность по частоте.

Как видно из формулы (14), разрешающая способность по частоте определяется методом спектрального анализа.

Рассмотрим помехоустойчивость представленного способа. Из статистической радиотехники известно, что способность обнаружения сигнала и оценки его параметров, в первую очередь, зависят от отношения сигнал/шум на выходе приемника. По определению, отношение сигнал/шум имеет вид

$$\frac{S}{N} = \frac{P_c}{\sigma^2}, \quad (15)$$

где P_c – мощность сигнала, σ^2 – дисперсия шума.

Будем считать, что в данном случае шум является белым, стационарным на интервале наблюдения со спектральной плотностью $0,5 N_0$. Известно также, что основная часть энергии гармонического сигнала находится в полосе $2\Delta f = 2/T$. Тогда дисперсия шума принимает вид:

$$\sigma^2 = 0,5 N_0 2\Delta f = N_0 \Delta f = \frac{N_0}{T}. \quad (16)$$

Подставим выражение (16) в (15) и получим

$$\frac{S}{N} = \frac{P_c}{\sigma^2} = \frac{P_c T}{N_0} = \frac{\mathcal{E}}{N_0}. \quad (17)$$

где $\mathcal{E}$ – энергия сигнала.

Реализация метода

Рассмотрим реализацию предложенного способа (рис. 3). Сначала принимается эхосигнал $s(\alpha t)$ на приемную антенну. Отраженные сигналы на соответствующих номерах отсчета фильтруем с помощью полосового фильтра, усиливаем, пропускаем через АЦП и перемножаем, затем полученный сигнал обрабатываем. В заключение делаем вывод об обнаружении или необнаружении объекта и вычисляем расстояние до него по времени задержки, а по полученной периодограмме оцениваем скорость подводного объекта.

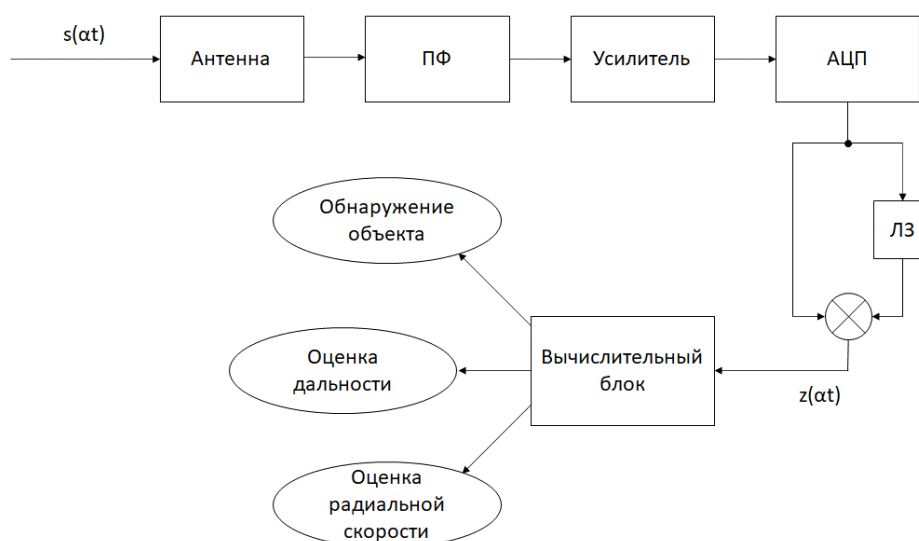


Рис. 3. Структурная схема приемного устройства (ПФ – полосовой фильтр, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЛЗ – линия задержки)

Заключение

В статье представлен метод обработки последовательности из двух ЛЧМ-сигналов. Показано, что при смешивании ЛЧМ-сигналов с одинаковыми коэффициентами девиации, но разными мгновенными частотами образуется гармонический сигнал с постоянной частотой, сдвиг которой зависит от доплеровского параметра. Таким образом, обработка сигналов свелась к выделению гармонической составляющей и оценке ее частоты. Такая задача решается методами спектрального анализа на основе быстрых алгоритмов Фурье и позволяет не вводить приближений, связанных с потерей в отношении сигнал/шум, как описано в [6].

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. 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. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/58-64
4. Abraham D.A. Underwater acoustic signal processing. ASA Press, Springer, 2019. 834 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92983-5
5. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M., Schimlall H. Computational Ocean acoustics. Springer New York, Dordrecht Heidelberg, London, 2011. 795 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8678-8
6. 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 3/52

Hydraulic Engineering, Engineering Hydrology

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/90-94>

Shostak S., Bengard A., Shpak Yu.

SERGEY V. SHOSTAK – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, servash@mail.ru

ALEXANDER V. BENGARD – Postgraduate Student, bengard.av@dvfu.ru

YULIYA V. SHPAK – Postgraduate Student, shpak.yv@dvfu.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Method for processing a complex wideband signal with parabolic frequency modulation

Abstract. The article describes a signal processing method consisting of a sequence of two parabolic frequency modulation signals. Mathematical calculations of processing such a signal was carried out, and mathematical modeling was performed in the MATLAB environment under two conditions: in the presence of a moving and non-moving target in the water. The method for implementing a method of synthesized signal processing in real time is also provided.

Keywords: Doppler effect, radial velocity, parabolic frequency modulation, broadband signal

For citation: Shostak S., Bengard A., Shpak Yu. Method for processing a complex wideband signal with parabolic frequency modulation. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(3):90-94. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Marple S.L.Jr. Digital spectral analysis and its application. Moscow, Mir, 1990. 584 p. (In Russ.).
2. Shenderov E.L. Hydroacoustics wave tasks. Leningrad, Sudostroenie, 1972. 348 p. (In Russ.).
3. Shostak S., Bengard A. Small-sized underwater object detection and radial velocity and range estimate task solution based on discrete-coded frequency-modulated signal sequence. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(1):58–64. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2022-1/58-64
4. Abraham D.A. Underwater acoustic signal processing. ASA Press, Springer, 2019. 834 p. DOI: 10.1007/978-3-319-92983-5
5. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M., Schimlall H. Computational Ocean acoustics. Springer New York, Dordrecht Heidelberg, London, 2011. 795 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8678-8
6. Tianzeng X., Lufen X. Digital Underwater Acoustic Communications. China Ocean Press, Elsevier Inc., 2017. 290 p. DOI: 10.1016/C2014-0-00624-7