

EDN: AXASTR

УДК 621.376.32

## Processing of the Discrete Sequence of Complex Signals with Linear Frequency Modulation for Underwater Target Detection and the Radial Velocity Estimation

Sergey V. Shostak<sup>a</sup>, Aleksandr V. Bengard<sup>a</sup>,  
Grigoriy V. Dorofeev<sup>\*b</sup> and Pavel A. Starodubtsev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Far Eastern Federal University*

<sup>b</sup>*Pacific Higher Naval School named after S. O. Makarov  
Vladivostok, Russian Federation*

Received 09.04.2024, received in revised form 12.07.2024, accepted 21.07.2024

**Abstract.** This article is devoted to the development of a method for two-channel processing of a discrete sequence of signals with linear frequency modulation for small-sized moving underwater target detection and its radial velocity estimation. Mathematical formulas are given that justify the approach to this method development. A block diagram of a device for processing such a signals sequence is presented.

**Keywords:** linear frequency modulation, Doppler effect, target detection, radial velocity estimation.

Citation: Shostak S. V., Bengard A. V., Dorofeev G. V., Starodubtsev P. A. Processing of the discrete sequence of complex signals with linear frequency modulation for underwater target detection and the radial velocity estimation. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2024, 17(5), 678–682. EDN: AXASTR



# Обработка дискретной последовательности сложных сигналов с линейной частотной модуляцией для обнаружения и оценки радиальной скорости подводной цели

С. В. Шостак<sup>а</sup>, А. В. Бенгард<sup>а</sup>,  
Г. В. Дорофеев<sup>б</sup>, П. А. Стародубцев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Дальневосточный федеральный университет

<sup>б</sup>Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С. О. Макарова

Российская Федерация, Владивосток

**Аннотация.** Статья посвящена разработке способа двухканальной обработки дискретной последовательности сигналов с линейной частотной модуляцией для обнаружения малоразмерной подвижной подводной цели и для оценки ее радиальной скорости. Приведены математические формулы, обосновывающие подход к разработке данного метода. Представлена структурная схема устройства обработки такой последовательности сигналов.

**Ключевые слова:** линейная частотная модуляция, эффект Доплера, обнаружение цели, оценка радиальной скорости.

Цитирование: Шостак С. В. Обработка дискретной последовательности сложных сигналов с линейной частотной модуляцией для обнаружения и оценки радиальной скорости подводной цели / С. В. Шостак, А. В. Бенгард, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(5). С. 678–682. EDN: AXASTR

При проектировании гидроакустической системы (ГАС) выбор формы сигнала играет существенную роль, так как определяем такие её характеристики, как помехозащищенность, разрешающая способность по дальности и скорости, точность измерения координат. В современных и перспективных ГАС широкое применение находят сложные сигналы с частотной или фазовой модуляцией [1, 2, 3]. Положительным свойством таких сигналов является их хорошее отражение от цели и распространение в гидроакустическом канале без искажения формы сигнала [1, 2, 3]. Обработка принятых эхо-сигналов проводится методом корреляционного сравнения или согласованной фильтрации [1, 2, 3]. Из теории корреляционного анализа известно, что в этом случае разрешающая способность по дальности и точность ее измерения обратно пропорциональна полосе частот зондирующего сигнала. Поэтому для улучшения этих характеристик целесообразно увеличивать полосу зондирующего сигнала, что на практике связано с определенными технологическими трудностями.

Рассмотрим способ обработки сигналов с линейной частотной модуляцией, когда возможно увеличение полосы частот в процессе анализа сигналов.

Составим дискретную последовательность из двух сигналов с линейной частотной модуляцией вида

$$s_1(t) = \cos[2\pi(f_1t + 0,5bt^2)]. \quad (1)$$

$$s_2(t) = \cos[2\pi(f_2t - 0,5bt^2)]. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $f_1$  – начальная частота первого сигнала,  $b = \frac{F}{T}$  – коэффициент девиации,  $F$  – полоса частот,  $T$  – длительность сигнала,  $f_2$  – начальная частота второго сигнала,  $f_1 > f_2$ .

На рис. 1 представлены мгновенные частоты сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ . Мгновенная частота  $s_1(t)$

$$f_1(t) = f_1 + bt; \quad (3)$$

мгновенная частота  $s_2(t)$

$$f_2(t) = f_2 - bt. \quad (4)$$

Дискретная последовательность из  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  имеет вид

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

Для обработки последовательности (5) воспользуемся одним свойством, характерным для сигналов вида  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ , для чего смешаем (перемножим) их

$$\begin{aligned} z(t) &= s_1(t) \cdot s_2(t) = \cos[2\pi(f_1 t + 0,5bt^2)] \cdot \cos[2\pi(f_2 t - 0,5bt^2)] = \\ &= 0,5 \cos[2\pi(f_1 + f_2)t] + 0,5 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + bt^2] = z_1(t) + z_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$z_1(t) = 0,5 \cos[2\pi(f_1 + f_2)t]; \quad (7)$$

$$z_2(t) = 0,5 \cos [2\pi(f_1 - f_2)t + bt^2]. \quad (8)$$

Из полученных выражений (7) и (8) видно, что мгновенная частота  $z_1(t)$  имеет вид

$$f_{z1} = (f_1 + f_2), \quad (9)$$

т.е. постоянное значение, а мгновенная частота  $z_2(t)$

$$f_{z2} = (f_1 - f_2) + 2bt = (f_1 - f_2) + \frac{2F}{T} t \quad (10)$$

с начальной частотой  $(f_1 - f_2)$  и полосой  $2F$  на длительности одного сигнала  $T$ .

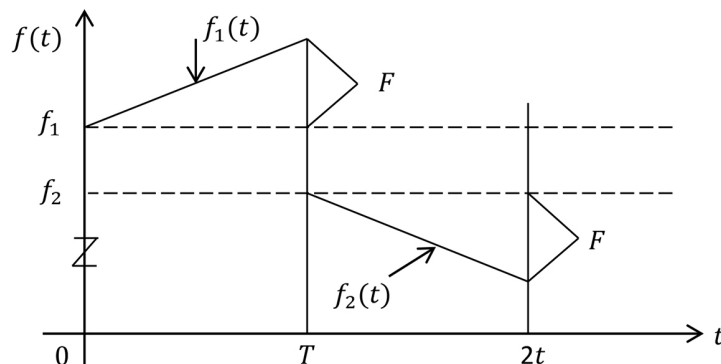


Рис. 1. Мгновенные частоты сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$

Fig. 1. Instantaneous signal frequencies  $s_1(t)$  and  $s_2(t)$

Полученные составляющие  $z_1(t)$  и  $z_2(t)$ , как легко заметить, находятся в различных частотных полосах, что позволяет проводить их обработку отдельно.

Рассмотрим теперь случай, когда цель подвижна. В этом случае временной масштаб эхосигналов изменяется:  $t \rightarrow \alpha t = (1 \pm \frac{2v_p}{c})t$ , где  $v_p$  – радиальная скорость цели,  $c = 1500$  м/с –

скорость звука в воде, т.е. имеется доплеровская трансформация масштаба времени [1, 3].

Легко показать, что (7) и (8) приобретают вид

$$z_1(t) = 0,5 \cos[2\pi\alpha(f_1 + f_2)t]. \quad (11)$$

$$z_2(t) = 0,5 \cos[2\pi\alpha(f_1 - f_2)t + \alpha^2 bt^2]. \quad (12)$$

Из выражения (11) следует, что так как

$$\cos \left[ 2\pi \left( 1 \pm \frac{2v}{c} \right) (f_1 + f_2)t \right] = \cos \left[ 2\pi \left( 1 \pm \frac{2v_r}{c} \right) f_{\Sigma} t \right], \quad (13)$$

где  $f_{\Sigma} = f_1 + f_2$ , то доплеровское влияние представляется как сдвиг  $f_{\Sigma}$  на  $\pm \frac{2v_r}{c} f_{\Sigma}$ . Это позволяет определять радиальную скорость цели, проводя спектральный анализ составляющей  $z_1(t)$ .

Из (12) видно, что  $z_2(t)$  – это низкочастотный ЛЧМ-сигнал с удвоенной полосой  $2F$  и с масштабом времени, преобразованным под действием эффекта Доплера. Для обработки такого сигнала следует применять корреляционные методы анализа. Реплики (опорные сигналы) в нашем случае получаются на основе выражений (11) и (12). Для этого следует использовать выражения

$$v = \frac{435(2F)}{((f_1 - f_2) + 2F)/2}. \quad (14)$$

$$v = \frac{2614}{T(2F)}, \quad (15)$$

которые показывают, как соотносятся параметры зондирующего сигнала и радиальной скорости цели в узкополосном (14) и широкополосном приближении (15), когда максимум корреляционной функции уменьшается на  $-3$  дБ [1].

Рассмотрим возможную реализацию полученных результатов в виде устройства. На рис. 2 приведена структурная схема устройства.

Устройство содержит линию задержки ЛЗ ( $T$ ) на длительность одного сигнала последовательности  $T$ , перемножителя, которые предназначены для реализации выражения (6), полосового фильтра (ПФ) с центральной частотой  $(f_1 + f_2)$  для выделения  $z_1(\alpha t)$ , блока спектрального анализатора, где вычисляется спектральная плотность сигнала  $z_1(\alpha t)$  с оценкой радиальной скорости. В состав устройства также входит низкочастотный фильтр (НЧФ) для выделения составляющей  $z_2(\alpha t)$ , коррелятор с банком реплик, по результатам функционирования которых обнаружитель выделяет сигналы после сравнения с порогом. При этом разрешающая способ-

ность по дальности пропорциональна  $\frac{1}{2F}$ .

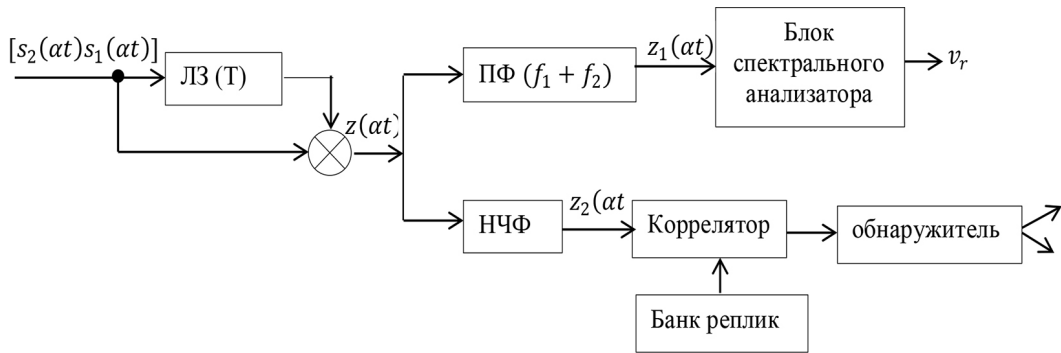


Рис. 2. Структурная схема устройства обработки дискретной последовательности  $[s_1(t) s_2(t)]$

Fig. 2. Block diagram of a discrete sequence processing device  $[s_1(t) s_2(t)]$

Одиночные сложные сигналы с линейной частотной модуляцией широко используются в современных и перспективных гидроакустических системах для обнаружения подводных целей и оценки их радиальных скоростей. Обработка таких сигналов проводится методом корреляционного сравнения. При этом естественно стремление получить более высокие точности измерения дальности, разрешающей способности по дальности, которые обратно пропорциональны полосе частот сигнала, и оценку радиальной скорости цели, которая оценивается косвенно по корреляции эхо-сигнала и соответствующей реплики. В представленной работе изложен способ обработки дискретной последовательности сложных сигналов с линейной частотной модуляцией. За счёт сдвиговых преобразований в процессе обработки получены низкочастотный сигнал с линейной частотной модуляцией и удвоенной полосой частот и гармонический сигнал с частотой из суммы двух начальных частот, составляющих последовательности. Применение такого преобразования позволяет существенно увеличить частотную полосу анализа, что значительно улучшает разрешающую способность по дальности, а наличие гармонического сигнала постоянной частоты даёт возможность оценивать радиальную скорость с достаточно высокой точностью.

### Список литературы / References

- [1] Richard O. Nielsen. *Sonar signal processing*. Artech House, Boston, London, 1991. 368.
- [2] Douglas A. Abraham. *Underwater Acoustic Signal Processing. Modeling, Detection, and Estimation*. Springer Nature Switzerland AG, 2019, 834.
- [3] Waite A. D. *Sonar for Practising Engineers*. Third Edition. Published by John Wiley & Sons Ltd, Baffles Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 2002, 298.
- [4] Марпл С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*, М.: Мир, 1990, 584. [Marple S. L. *Digital spectral analysis and its applications*, Moscow: World, 1990, 584. (in Rus.)]
- [5] Kay S. M. *Modern spectral estimation/ theory and application*. New Jersey, Prentice Hall, 1988. 328.