

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ БЫСТРОПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ГИДРОЛОКАЦИИ

THE METHOD OF FAST-MOVING OBJECT DETECTION IN SONAR APPLICATIONS

**I. Rozanov
T. Kim
A. Sotnikov**

Summary. The authors proposed a method of coding and signal processing for the sonar fast-moving objects detection tasks. The method is based on the frequency manipulation of signals and provides effective power consumption of the transmitter, while maintaining high range and speed resolution within given noise immunity. The results of the research showed its effectiveness in the correlation processing of signals that are reflected from fast-moving underwater objects and distorted due to the Doppler effect.

Keywords: sonar, frequency manipulation, Doppler effect, correlation processing.

Розанов Иван Александрович

Аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ким Тамара Александровна

Аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сотников Алексей Александрович

К.т.н., Московский Государственный Технический

Университет им. Н.Э. Баумана

sotnikov@bmstu.ru

Аннотация. Авторами предложен метод кодирования и обработки сигнала для задач обнаружения быстроподвижных объектов в гидролокации. Метод основан на использовании частотной манипуляции сигналов и обеспечивает эффективное использование мощности излучателя, сохраняя высокую разрешающую способность по дальности и скорости при заданной помехоустойчивости. Результаты исследования данного метода показали его эффективность при корреляционной обработке сигналов, отражённых от быстроподвижных подводных объектов и искажённых вследствие эффекта Доплера.

Ключевые слова: гидроакустика, частотная манипуляция, эффект Доплера, корреляционный поиск.

Введение

Поиск и обнаружение подводных объектов является основной задачей в гидролокации. Наиболее широко распространенным в настоящее время методом обнаружения объекта и оценки его координат и других параметров является согласованная фильтрация [1].

Способность варьировать и подбирать в соответствии с теми или иными требованиями различные характеристики сигнала является существенным фактором развития современных гидролокационных систем, использующих сложные методы обработки. При помощи этих методов достигается более эффективное использование мощности излучателя, более высокая разрешающая способность по дальности и по скорости, повышение помехоустойчивости по отношению к определенным типам интерферирующих сигналов, свойства которых отличаются от свойств кодированных сигналов, также имеется возможность оценки параметров сигналов, несущих информацию о дальности, скорости и, возможно, ускорении объектов [2].

Важной характеристикой сигнала, по которой можно оценить его применимость к решению конкретной задачи гидролокации, является функция неопределенности (ФН) — двумерная функция $\chi(\tau, \Delta f)$, представляющая собой корреляционную функцию модулирующей функции передаваемого сигнала, движущей на величину доплеровского частотного сдвига Δf , и модулирующей функции передаваемого сигнала, нулевой сдвиг ($\tau = 0$), между которыми имеет место в начальный момент времени $t = T_0$ [3]. При $\Delta f = 0$ функция неопределенности сводится к автокорреляционной функции модулирующей функции передаваемого сигнала:

$$\chi(\tau, \Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t - \tau)e^{i2\pi\Delta f t} dt,$$

где * — операция комплексного сопряжения; τ — разность между фактической задержкой эхо-сигнала и доплеровским сдвигом, на которую настроен фильтр; Δf — разность между доплеровской частотой принимаемого сигнала и доплеровской частотой, на которую настроен фильтр; i — мнимая единица.

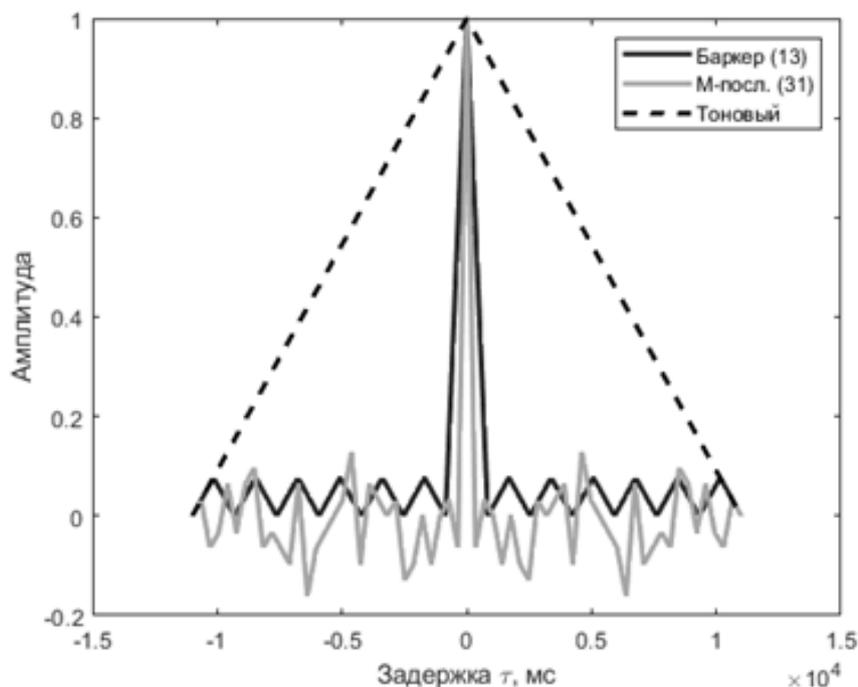


Рис. 1. График АКФ кода Баркера, M-последовательности, тонового сигнала

Анализ характеристик зондирующих сигналов

К основным факторам, определяющим выбор зондирующего сигнала в импульсных гидролокационных системах, относятся требования к разрешению по дальности и предельная дальность обнаружения, что в случае применения простых сигналов вызывает противоречия при выборе длительности импульса.

Согласно фундаментальной работе Вудворта [4], форма сигнала представляет собой дополнительный параметр при проектировании гидролокатора. Его характеристики, такие как дальность и разрешение по дальности, определяются как длительностью излучаемого импульса и средней излучаемой мощностью, так и формой сигнала.

Из изложенного в работе Вудворта следует, что длительность излучаемого импульса можно выбрать так, чтобы удовлетворить энергетические требования к гидролокатору.

Зафиксировав характеристики обнаружения, можно достичь требуемых значений разрешения по дальности путём кодирования излучаемого сигнала при помощи широкополосной модуляции.

Таким образом, разрешение по дальности и точность измерений могут быть обеспечены не длительно-

стью сигнала, а шириной полосы его частотного спектра.

Поскольку ширина полосы частот напрямую влияет на разрешающую способность обнаружения, целесообразно использовать сигнал с высоким значением базы:

$$B = FT \gg 1,$$

где F — ширина спектра, а T — длительность сигнала.

Сигналы с такими параметрами называют шумоподобными сигналами (ШПС), они создаются благодаря дополнительной модуляции несущих колебаний по псевдослучайному закону.

M-последовательность является одним из примеров бинарного генератора псевдослучайной последовательности: она представляет собой битовый набор, сгенерированный с использованием сдвиговых регистров. M-последовательность является периодической и воспроизводит каждую двоичную последовательность (кроме нулевого вектора), которая может быть представлена сдвигowymi регистрами.

Другим типом ШПС является код Баркера — это ряд, состоящий из N элементов a_j , принимающих значения 1 и -1 для $j = 0, 1, \dots, N - 1$ и чередующихся так, что

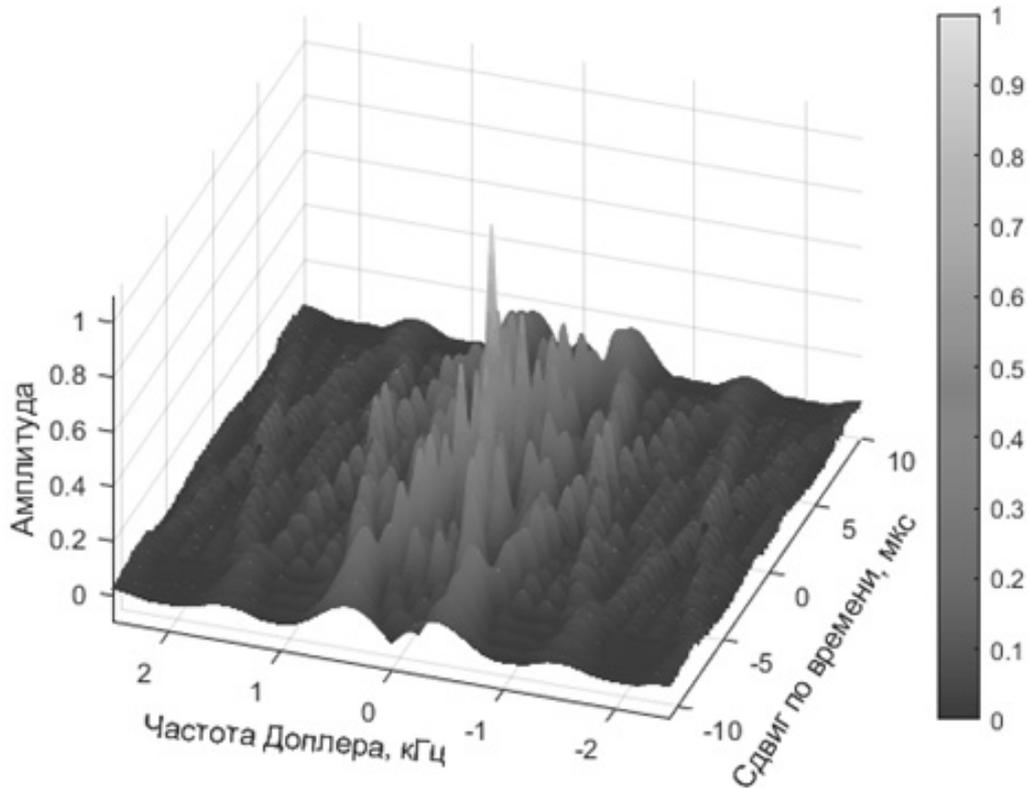


Рис. 2. График ФН фазоманипулированного кодом Баркера сигнала

$$\left| \sum_{j=0}^{N-v} a_j a_{j+v} \right| \leq 1$$

для всех $1 \leq v \leq N$.

Уровень боковых лепестков известных кодов Баркера не превышает величины $1/N$; периодическая АКФ любой M -последовательности имеет постоянный уровень боковых лепестков, равный $1/N$; АКФ усечённой M -последовательности, под которой понимается непериодическая последовательность длиной в период N , имеет величину боковых лепестков, близкую к $1/\sqrt{N}$, где N — число элементов последовательности.

Сравнение автокорреляционной функции (АКФ) кода Баркера максимальной длины ($N = 13$), тонавого сигнала и шумоподобного сигнала на основе M -последовательности ($N = 31$) представлены на рисунке 1. Сравнение происходит по принципу единой мощности излучаемого сигнала: равная частота дискретизации и единое время посылки.

Из рисунка 1 видно, что ширина главного лепестка снижается с увеличением N , позволяя точнее опреде-

лять момент времени максимальной корреляции, что способствует увеличению разрешения по дальности для задач гидролокации. Также необходимо оценить величину боковых лепестков корреляционной функции, которые могут способствовать ошибочному локальному максимуму.

Узкий главный лепесток АКФ и невысокий уровень боковых лепестков позволяют широко применять шумоподобные сигналы с фазовой манипуляцией в системах корреляционной обработки.

Анализ особенностей обнаружения быстро движущихся объектов в гидролокации

Методы и алгоритмы обработки ШПС широко применяются в радиолокации и достаточно подробно описаны в литературе [5, 6]. В отличие от радиолокации гидролокация имеет ряд особенностей в следствие различных условий распространения сигнала в среде [7].

Для рассматриваемой задачи цифровой обработки сигналов в гидролокации наиболее важной особенностью акустической волны является низкая скорость распространения в среде, которая соизмерима

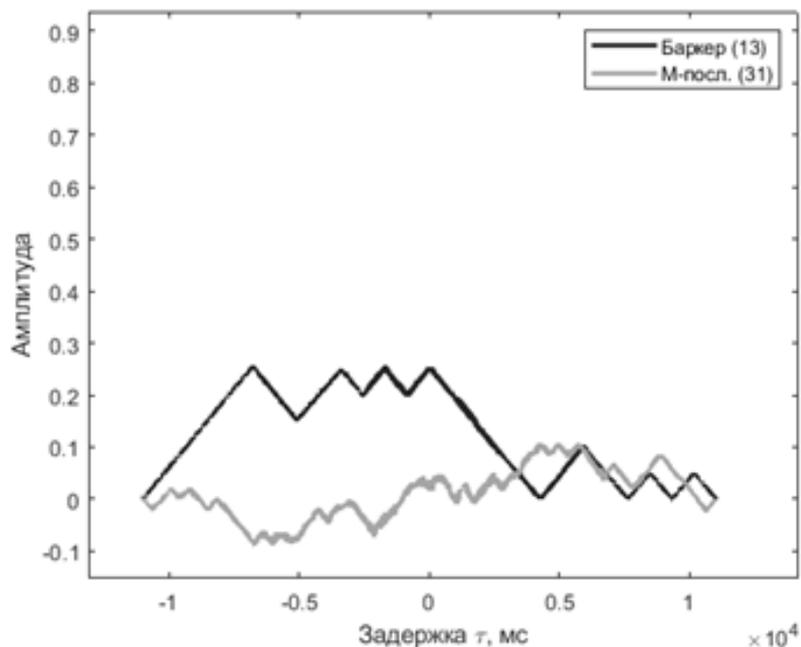


Рис. 3. Срез графика ФН фазоманипулированного кодом Баркера и М-последовательностью сигналов при 2% смещении частоты

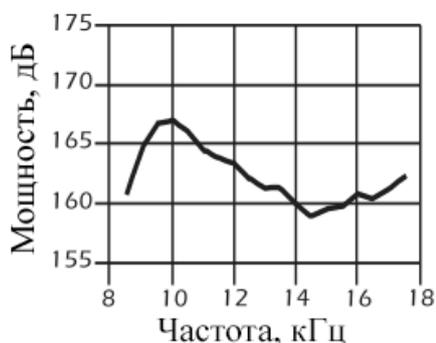


Рис. 4. График АЧХ для антенной решетки AIRMAR10kHz-H

со скоростью движения объектов. В таких условиях появляются доплеровское смещение частот и существенное искажение сигналов, отраженных от движущихся целей, при котором корреляционная обработка фазоманипулированного сигнала существенно затруднена, что наглядно представлено на графике функции неопределенности (рисунок 2). Эффекты сжатия или растяжения гидроакустических сигналов проявляются почти на два порядка сильнее, чем в радиолокации.

Срез ФН в смещенной частоте в результате эффекта Доплера для М-последовательности и кода Баркера показан на рисунке 3.

Описание метода обработки гидролокационных сигналов с частотной манипуляцией

В целях сохранения качества корреляционной обработки гидролокационных сигналов, отраженных от быстро движущихся объектов, авторами предложено использование зондирующих сигналов с частотной манипуляцией вместо фазового кодирования.

При частотной манипуляции сигнала необходимо учитывать амплитудно-частотную характеристику гидрофонов с целью использованию одновременно нескольких частот для передачи с высокой мощностью.

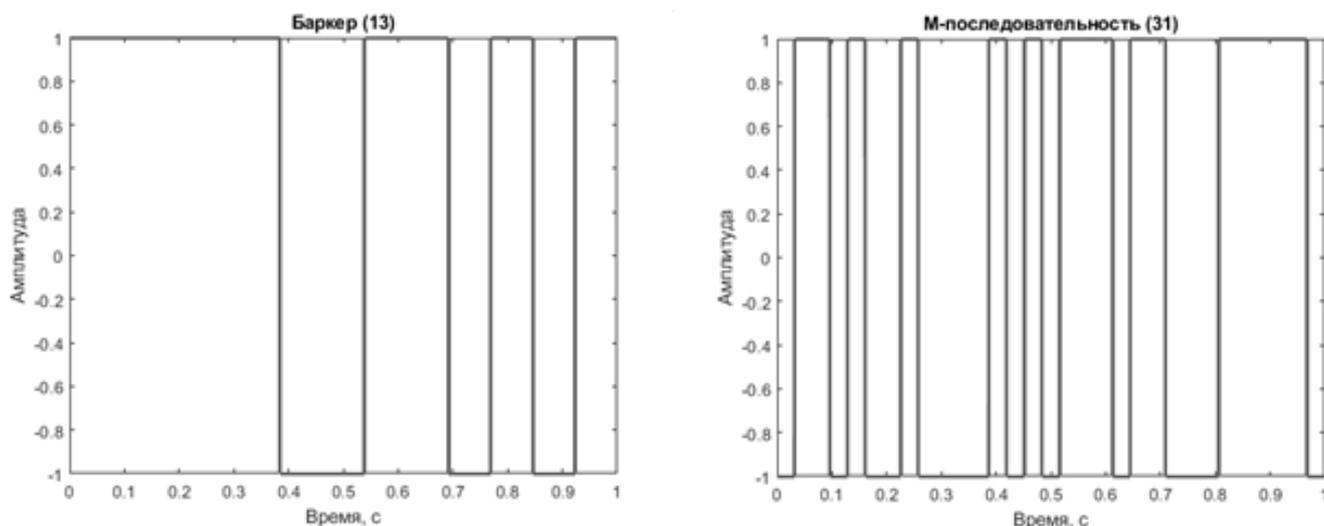


Рис. 5. Графики сигналов, реализующих код Баркера (слева) и M-последовательность (справа)

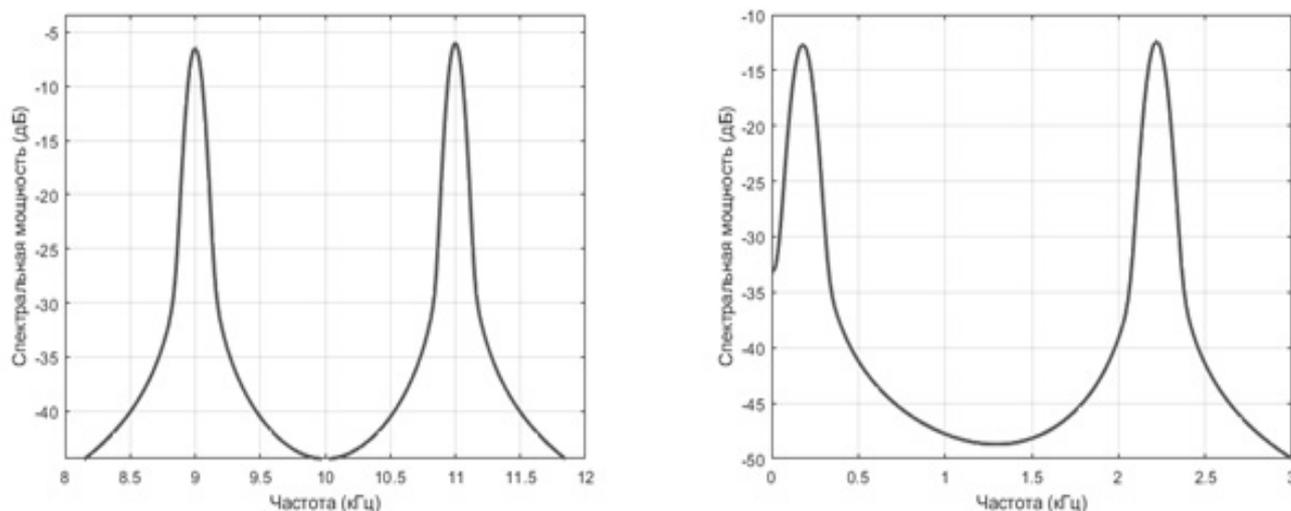


Рис. 6. График спектральной мощности исходного и гетеродинированного сигналов

Так, например, антенная решетка AIRMAR10kHz-H позволяет передавать сигналы на частотах 9 кГц и 11 кГц примерно с равной мощностью (рисунок 4).

Для обнаружения сигнала отраженного частотно-манипулированного авторами предлагается следующий алгоритм:

1. Формирование ШПС сигнала длины N :

$$S_N(t) = (s_1, s_2, \dots, s_N), \approx s_i \in [-1; 1], \approx i = \overline{1 \dots N}$$

2. Выполнение частотной манипуляции в двух несущих частотах

f_1 и $f_2; f_1 < f_2$:

$$x(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_1 t), & \text{если } S_N(t) = -1 \\ \cos(2\pi f_2 t), & \text{если } S_N(t) = 1 \end{cases}$$

3. Для уменьшения вычислительной сложности предварительно осуществляется гетеродинирование с переносом на промежуточную нулевую частоту, используя f_2 :

$$x_0(t) = \text{Re}[LPF(x(t) \cdot e^{j2\pi f_2 t})],$$

где LPF — передаточная функция фильтра нижних частот.

4. Вычисление оконного преобразования Фурье:

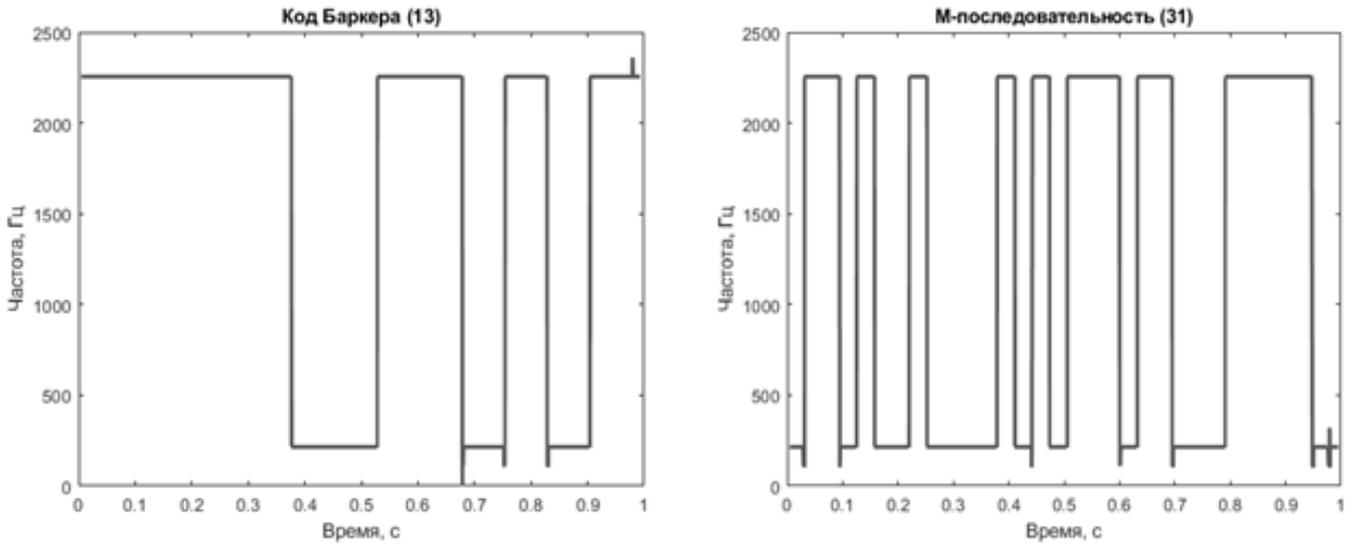


Рис. 7. График оконного преобразования Фурье для сигналов кода Баркера (слева) и M-последовательности (справа)

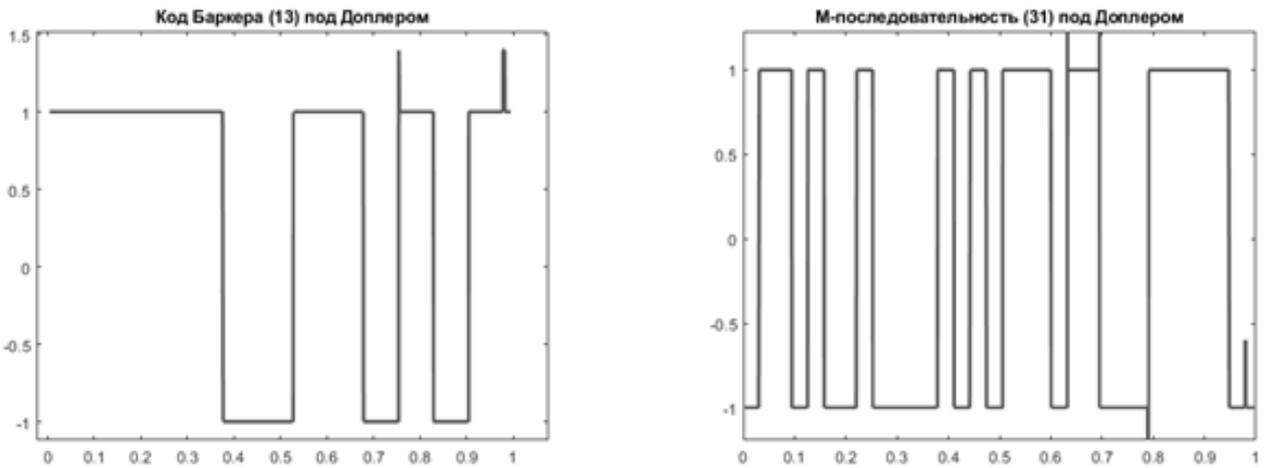


Рис. 8. Графики восстановленных сигналов, соответствующих последовательности Баркера (слева) и M-последовательности (справа)

$$f_{x_0}(t) = \text{STFT}[x_0(t)].$$

5. Коррекция значений частоты в условиях смещения Доплера:

$$F_{max} = \text{median} \{ f(t) \mid f(t) \geq \text{mean}[f(t)] \},$$

$$F_{min} = \text{median} \{ f(t) \mid f(t) < \text{mean}[f(t)] \},$$

$$f(t) = 2 \cdot \frac{f(t) - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} - 1. \quad (1)$$

6. Корреляционный поиск путем применения взаимокорреляционной функции между исходной и полученной последовательностями:

$$(S_N \star S_R)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\tau) g(t + \tau) d\tau \quad (2)$$

Для проведения экспериментальных работ в соответствии с предложенным методом выбрана M-последовательность длины $N = 31$ и максимальный код

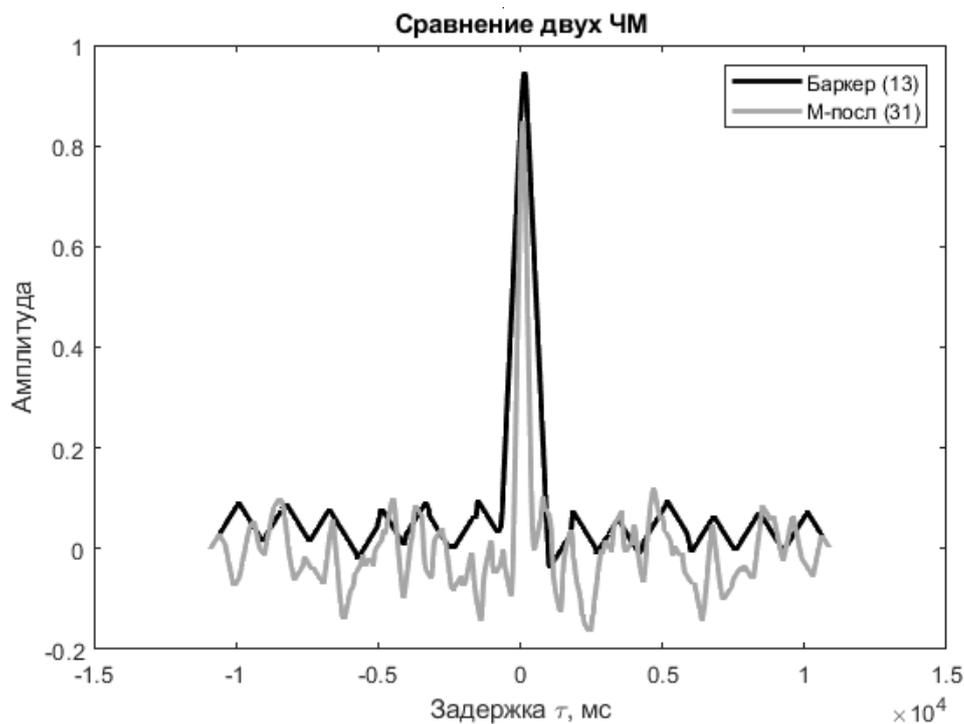


Рис. 9.— График взаимнокорреляционной функции исходного и восстановленного сигналов для последовательности Баркера и М-последовательности

Баркера длины $N = 13$, а также несущие $f_1 = 9$ кГц и $f_2 = 11$ кГц.

Периодический сигнал, полученный в результате кодирования, показан на рисунке 5.

Изменение спектральной мощности сигнала на примере сигнала частотно-манипулированной М-последовательности после применения частотной манипуляции и гетеродинирования показано на рисунке 6.

Результаты оконного преобразования Фурье представлены на рисунке 7. Наличие шумовых всплесков, неизвестного значения частоты Доплера и изначально нечетное, и, следовательно, неравное количество значений в исходных кодах обуславливает необходимость коррекции и нормализации результата к значениям -1 и 1 .

На рисунке 8 представлены восстановленные ЧМ-ШПС сигналы после коррекции (1).

Результат функции, вычисленной по формуле (2), показан на рисунке 9.

Заключение

Таким образом, авторами представлен метод кодирования и обработки сигнала для задач обнаружения быстроподвижных объектов в гидролокации. Результаты исследования данного метода показали его эффективность при корреляционной обработке сигналов, отражённых от быстроподвижных подводных объектов и искажённых вследствие эффекта Доплера.

Разработанный метод может быть использован в рамках задач интеллектуальной обработки многомерных сигналов с использованием пиковых значений АКФ в качестве значений целевой функции. Данное исследование выполнено в рамках выполнения гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00049 от 12.05.2022).

ЛИТЕРАТУРА

1. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х т.: Пер. с фр. Мир, 1983. Vol. 1.
2. Шостак С.В. et al. Решение задачи "Обнаружение-измерение дальности" для малоподвижных объектов методом активной корреляции. // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 3.
3. Сколник М. Основы радиолокации. Сов. Радио. 1976. Vol. 1.

4. Woodward P.M., Higinbotham W. Probability and Information Theory, with Applications to Radar: International Series of Monographs on Electronics and Instrumentation / ed. Fry D.W. Pergamon, 2014. 146 p.
5. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. Радио и связь, 1991. 296 p.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Радио и связь, 1985. 384 p.
7. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. 2 p.
8. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Мир, 1978.
9. Шостак С.В. et al. Решение задачи “Обнаружение-измерение дальности” для малоподвижных объектов методом активной корреляции // Журнал радиоэлектроники. Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им . . . , 2015. № 3. P. 16–16.
10. Suvasini L. et al. Extraction of Binary Sequences in a Frequency Shift Keying-Modulated Signal by Empirical Mode Decomposition Algorithm Against Ambient Noises in Underwater Acoustic Channel // Artificial Intelligence and Evolutionary Algorithms in Engineering Systems / ed. Suresh L.P., Dash S.S., Panigrahi V.K. New Delhi: Springer India, 2015. Vol. 325. P. 371–378.
11. Бердышев В.П. et al. Радиолокационные системы. СФУ, 2021.

© Розанов Иван Александрович, Ким Тамара Александровна, Сотников Алексей Александрович (sotnikov@bmsu.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана