

УДК 681.883.022: 681.883.65

ФРАКТАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ ЭХО-СИГНАЛА

Н. Н. Семенов,

соискатель

Санкт-Петербургский морской технический университет

Предложен новый алгоритм для обнаружения морских подводных целей, основанный на оценке меры случайности сигнала на входе гидролокатора. В качестве меры предлагается фрактальная размерность.

Введение

Классическая задача обнаружения гидролокационных сигналов на фоне случайных помех рассматривается с помощью методов статистической теории решений, которая является разделом математической статистики. Из-за статистической природы анализируемого случайного входного процесса полученный результат имеет ту или иную степень достоверности.

Существующие обнаружители эхо-сигналов сравнивают уровень выходного отклика гидролокационного приемника с заданным порогом для двух возможных гипотез: когда на входе присутствует только помеха или совокупность эхо-сигнала и помехи. С превышением заданного порога принимается решение об обнаружении сигнала. Выбранный уровень порога определяет вероятность правильного обнаружения сигнала при фиксированной вероятности ложной тревоги [1, 2]. Недостатком такого подхода является наличие минимального отношения сигнал/помеха (ОСП), при котором возможно подобное обнаружение. В данной статье рассматривается один из алгоритмов обнаружения эхо-сигнала на фоне помех не по энергетическому критерию, а по косвенному признаку — фрактальной размерности.

Сравнение различных типов существующих обнаружителей

Условимся, что объект локации имеет близкую структуру [1]. Таким образом, эхо-сигнал от объекта локации представляется состоящим из 2–3 ярких бликующих точек, 20–50 точек с яркостью в 10 раз меньше и 200–600 — с яркостью в 100 раз меньше. Шум имеет равномерную спектральную плотность мощности в полосе приема [1, 3]. Несущая частота реального гидролокатора 20 кГц, полоса 2 кГц, длительность посылки 100 мс. В качестве сигнала был использован фазоманипулированный сигнал, кодированный М-последовательностью с длиной кода 127. Время окна анали-

за 300 мс. ОСП вычислялось через отношение полной энергии сигнала к энергии помехи за время анализа в заданной полосе частот.

1. Некогерентный обнаружитель.

На входе обнаружителя присутствует сумма эхо-сигнала и помехи:

$$s(t) = \sum_N z_i(t) + e(t),$$

где $z_i(t)$ — эхо-сигнал от i -й бликующей точки; $e(t)$ — помеха.

Некогерентный обнаружитель сравнивает амплитуду суммы сигнала и шума с амплитудой шума до и после прихода сигнала, и при превышении заданного относительного порога принимается решение об обнаружении. Плюсом такого обнаружителя является только его простота, минусом — низкая эффективность.

2. Когерентный обнаружитель.

Когерентный обнаружитель характеризуется использованием фильтра, согласованного с сигналом посылки. При этом обеспечивается наилучшее ОСП для эхо-сигналов каждой бликующей точки. Плюсом такого обнаружителя является его лучшее по сравнению с некогерентным приемом ОСП, минусом — использование при приеме только энергии эхо-сигнала каждой бликующей точки по отдельности.

3. Обнаружитель с накоплением энергии.

Поскольку объект локации имеет сложную бликовую структуру, необходимо использовать для обнаружения всю энергию эхо-сигнала, отраженного объектом. Алгоритм работы такого обнаружителя состоит из вычисления суммарной энергии сигнала на выходе согласованного фильтра за заданное время накопления и сравнения полученной энергии с порогом.

4. Автокорреляционный обнаружитель.

Автокорреляция случайного сигнала дает практически нулевые значения при любых сдвигах, кроме 0. Автокорреляция сложного эхо-сигнала

от одной бликующей точки тоже дает очень маленький уровень боковых лепестков, но так как объект локации отражает большим количеством бликующих точек, на выходе автокоррелятора появляются всплески, по которым можно обнаружить сложный эхо-сигнал.

Есть ли способы дальнейшего увеличения ОСП и дистанции обнаружения?

Фрактальная размерность шума и эхо-сигнала

Любой случайный процесс, такой как шум или эхо-сигнал со случайной фазой, можно представить для дальнейшей обработки как фрактальный объект [4], основной характеристикой которого является его размерность [4, 5]. Размерность представлена неотрицательным нецелым числом, отражающим геометрическую сложность объекта, т. е. является мерой случайности процесса. Появление в шумовом сигнале гидролокатора эхо-сигнала от искусственного объекта изменит величину фрактальной размерности сигнала в целом, что позволит использовать величину фрактальной размерности сигнала гидролокатора для обнаружения эхо-сигнала. Наиболее эффективно применять такой обнаружитель для поиска протяженных слабоконтрастных объектов на фоне сильных помех, так как на величину фрактальной размерности сигнала практически не влияют амплитудные характеристики формирующих его сигналов [6].

В связи с тем, что сигналы гидролокатора для когерентной обработки являются узкополосными, наиболее информативной с точки зрения обработки является амплитуда сигнала на выходе согласованного фильтра. Построим логарифмическую зависимость количества срабатываний абстрактного обнаружителя от величины порога для узкополосного шума и сигнала. Для этого выберем текущее окно в сигнале, найдем максимальную ампли-

туду сигнала и будем менять порог от нуля до этого максимума. Сколько отсчетов сигнала получается выше заданного порога для эхо-сигнала, шума и их суммы при ОСП = -5 дБ, показано на рис. 1.

Наклон зависимости на этих графиках сильно отличается и не связан с абсолютной амплитудой сигнала — все величины на рисунке относительные. Чтобы сравнивать графики, достаточно численно описать угол наклона асимптотической прямой. Так вычисляется хаусдорфова или фрактальная размерность [5]:

$$D|_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\log N(\Delta x)}{\Delta x},$$

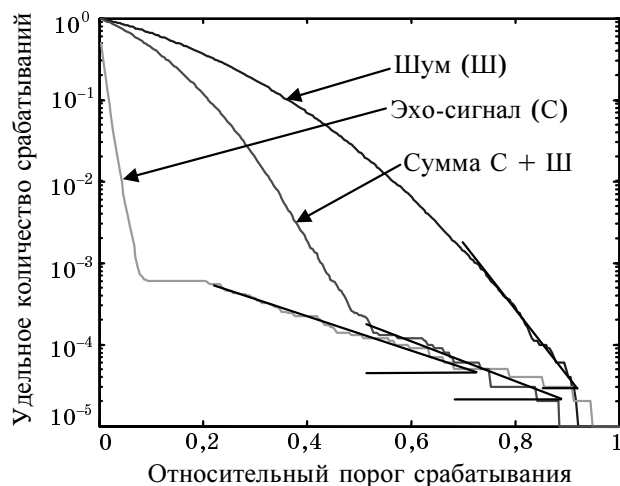
где Δx — интервал порога обнаружения; $N(\Delta x)$ — удельное количество срабатываний обнаружителя в интервале Δx .

Для случайного шума $D_{ш} = 1,03$ (и нет ярко выраженного линейного участка на графике), для чистого эхо-сигнала $D_c = 0,37$, для суммы сигнала и шума с ОСП = -5 дБ $D_{с+ш} = 0,41$.

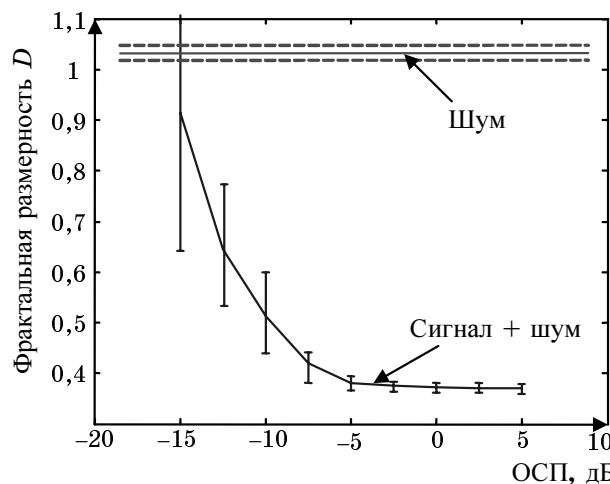
Моделирование работы обнаружителя в условиях шумов

Чтобы проверить работоспособность алгоритма, была построена компьютерная модель обнаружителя, позволяющая вычислить рабочую харак-

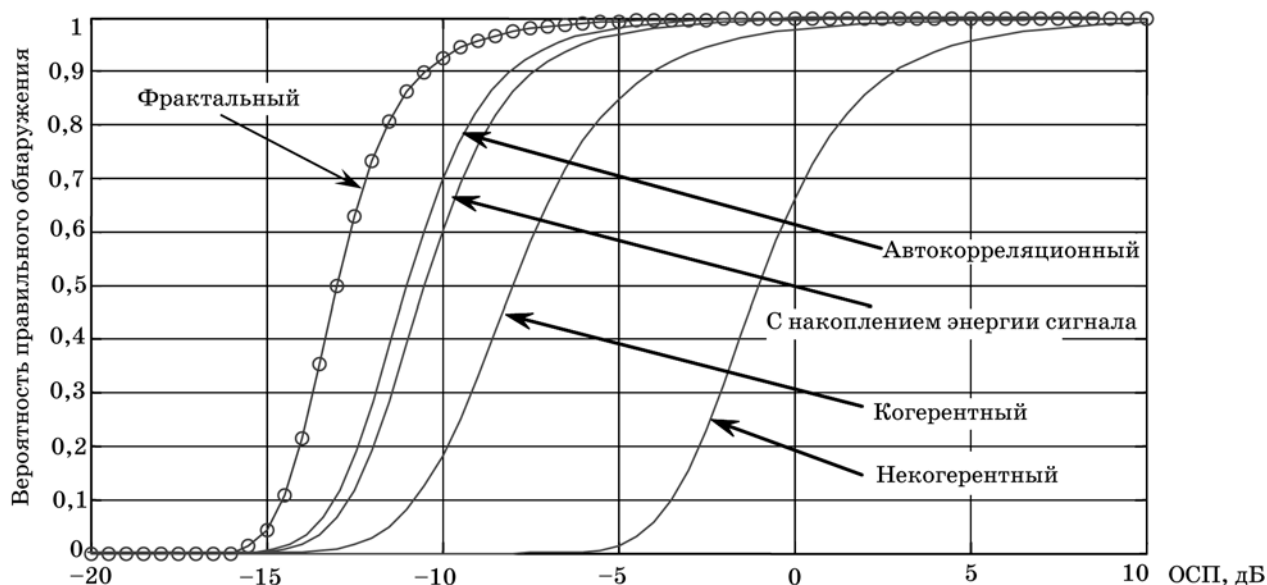
ОСП, дБ	Размерность D	Дисперсия размерности	Вероятность обнаружения
+10	0,374	0,015	0,999
0	0,380	0,064	0,999
-5	0,411	0,094	0,99
-10	0,527	0,141	0,92
-12	0,638	0,274	0,73
-15	0,825 (линейный участок выражен неявно)	4,190	0,06



■ Рис. 1. Поиск фрактальной размерности для суммы шума и сигнала



■ Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности от ОСП



■ Рис. 3. Сравнение РХО различных обнаружителей

теристику обнаружения (РХО), т. е. зависимость вероятности правильного обнаружения от ОСП (при фиксированной вероятности ложной тревоги). Результаты работы приведены в таблице и на рис. 2.

Из таблицы видно, что предложенный алгоритм позволяет обнаруживать эхо-сигнал при ОСП = -12 дБ с вероятностью 0,73. Для сравнения с существующими алгоритмами представим графики РХО для различных методов обнаружения при вероятности ложной тревоги $P_{л.т} = 0,01$ (рис. 3).

Выводы

Предложенный алгоритм обнаружения позволяет улучшить качество работы обнаружителя при низких значениях ОСП после согласованного фильтра на 3–5 дБ, что подтверждено численным моделированием при узкополосной помехе и когерентном приеме сложного сигнала.

Направлениями дальнейшего развития данной темы являются исследование и оптимизация работы классификатора при таких значениях ОСП,

при которых может успешно работать обнаружитель, а также влияние нестационарных помех и девиации амплитуды эхо-сигнала на качество функционирования обнаружителя.

Литература

1. Евтютов А. П., Митько В. Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 287 с.
2. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1976. 562 с.
3. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы. М.: Высш. шк., 1990. 210 с.
4. Пайтген Х.-О., Рихтер П. Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 530 с.
5. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. N. Y.: Freeman, 1982. 382 с.
6. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 2000. 470 с.