

УДК 621.391

К.С. Васюта<sup>1</sup>, А.Б. Гулей<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

<sup>2</sup>Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ СКРЫТНОСТИ РЕГУЛЯРНЫХ, ШУМОПОДОБНЫХ И ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ BDS-СТАТИСТИКИ

Некоторые фундаментальные свойства динамического хаоса вызвали естественный интерес исследователей к их использованию для обеспечения скрытности работы радиосистем (излучаемых ими сигналов) [1]. Достоинства таких радиосистем определяются использованием для передачи сообщений случайно подобных во временной (спектральной) области хаотических процессов (последовательностей) которые маскируют сигнал под шум. Однако, в отличие от случайных, «малоразмерные» хаотические процессы и последовательности, если размерность определить по числу начальных условий, при их анализе на фазовой плоскости (фазовом пространстве), имеют регулярную структуру и это свойство снижает их скрытность.

Под скрытностью будем понимать [2] способность противостоять мерам радиотехнической разведки: обнаружению сигнала и определению его структуры на основе оценки ряда его параметров без учета возможности раскрытия смысла информации.

Ниже решим задачу оценки параметров (раскрытия структуры) гармонических и хаотических сигналов на фоне шума используя BDS-статистику.

BDS-статистика и построенная на ее основе относительно новая процедура – BDS-тест были предложены в результате анализа финансовых рынков экономистами Брокком, Дечертом и Шейнкманом (В. Brock, W. Dechert и J. Scheinkman) в 1987 [3] и представляют один из мощных методов выявления зависимостей во временных рядах, интенсивно раз-

рабатываемых в последнее десятилетие в рамках их нелинейного анализа.

Его цель состоит в том, чтобы различить данные I.I.D. и любой вид зависимости – проверить нулевую гипотезу  $H_0$  о независимости и тождественном распределении значений временного ряда  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , используя для этого критерий значимости.

BDS-тест основан на статистической величине  $w(\vec{x})$  (BDS-статистике)

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}. \quad (1)$$

Задача обнаружения регулярного, шумоподобного и хаотического сигнала рассматривается как непараметрическая проверка одной из двух гипотез:  $H_0$  – наблюдаемые данные  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  независимы и одинаково распределены (белый шум), т.е. плотность (функция) распределения факторизуется  $F_N(x_1, x_2, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N F(x_i)$  и  $H_1$  – данные не I.I.D., что возможно в случае, когда они являются аддитивной смесью шума и сигнала, значения которого зависимы.

Задача оценки параметра (раскрытия структуры) задающего “форму” хаотического отображения и фактически являющегося ключом решается путем анализа значений BDS-статистики от невязки между наблюдением и ожидаемым сигналом.

Пусть на вход приемного устройства поступает аддитивная смесь полезного (хаотического) сигнала и белого гауссовского шума:

$$y_n = x_n + \xi_n, \quad (2)$$

где  $x$  – динамическая переменная (сигнал), заданная одномерным отображением  $x_{n+1} = f(x_n, k)$ ;  $k = k_{\text{ист}}$  – параметр отображения (ключ);  $\xi_n$  – последовательность независимых случайных величин, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_n^2$ .

Процедура оценки параметра  $k$  может быть осуществлена путем вычитания из наблюдения  $y_n$  ожидаемого сигнала  $s_n(\hat{k})$  (где  $s_{n+1} = 1 - \hat{k}s_n^2$ ):

$$r_n(\hat{k}) = y_n - s_n(\hat{k}), \quad (3)$$

где  $\hat{k}$  – оцениваемый параметр.

При совпадении оцениваемого параметра с истинным (см. рис.1)  $\hat{k} = k_{\text{эпб}}$ , т.е.  $s_n(\hat{k}) = x_n$  и, следовательно:

$$r_n(\hat{k}) = \xi_n. \quad (4)$$

Тогда BDS-статистика (1) от разности (6) при условии (7) с 95% вероятностью позволяет принять гипотезу  $H_0$  (I.I.D.). Другими словами значения BDS-статистики будут минимальны и попадать в доверительный интервал  $[0; 1,96]$ . Очевидно ожидать, что рассогласование между параметрами  $\hat{k} \neq k_{\text{эпб}}$  будет порождать в “наполняемости” фазового пространства аттракторами случайного и хаотического процессов (см. рис.2) и, как следствие, различия в зависимостях корреляционной размерности, т.е.  $w_{m,N}(\hat{k}) > |1,96|$ . Исходя из этого, минимизируя значения функции (1) можно получить выражение для оценки параметра  $k$ :

$$\hat{k} = \min_k \left[ \bar{w}_{m,N}(\hat{k}) \right]. \quad (5)$$

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования зависимости среднего значения BDS-статистики  $\bar{w}_{m,N}(\lambda)$ , полученного для логистического отображения:

$$x_{n+1} = f(x_n, \lambda) = \lambda x_n (1 - x_n),$$

для  $\lambda_{\text{эпб}} = 3,99$ , десяти реализаций шума при  $N = 1000$ . Непрерывной кривой показана зависимость BDS-статистики от оцениваемого параметра в отсутствие шума  $\sigma_n^2 = 0$ , а пунктирными – при наличии гауссовского шума для отношения сигнал/шум по мощности  $q^2 = \sigma_x^2 / \sigma_n^2 = 1; 3; 10$ . Из рисунка видно,

что увеличение уровня шума уменьшает крутизну зависимости  $\bar{w}_{m,N}(\lambda)$  в окрестности истинного значения параметра  $\lambda_{\text{эпб}}$ , расширяет и смещает ее относительно истинного значения.

Рассмотренный в работе метод оценки скрытности хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне аддитивных шумов, позволяет с заданной вероятностью оценивать их параметры. Для их оценки впервые применена непараметрическая BDS-статистика, которая в условиях полной априорной неопределенности (неизвестен вид распределений сигнала и помехи) позволяет классифицировать хаотические, шумоподобные и регулярные сигналы.

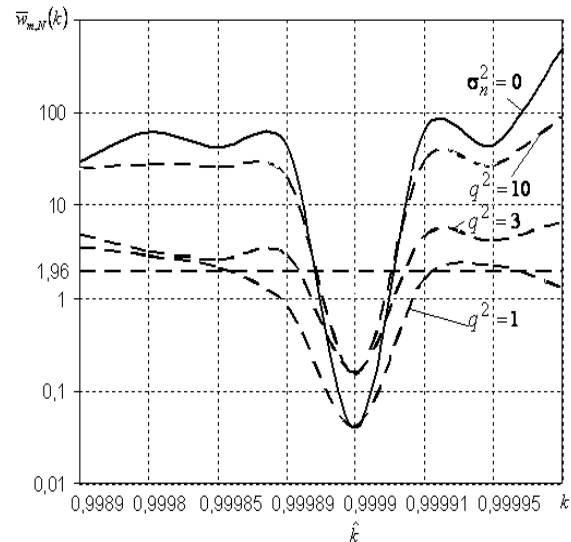


Рис. 1. Зависимость BDS-статистики от изменения значений оцениваемого параметра  $k$

Полученные результаты позволяют скомпрометировать скрытность хаотических и других шумоподобных сигналов. Во избежание этого рекомендуется применение специальных мер, направленных на разрушение структурированности аттрактора и усложнении взаимосвязей элементов наблюдаемого процесса.

### Список литературы

1. Дмитриев А.С. Динамический хаос как парадигма современных систем связи/ А.С. Дмитриев, А.И. Панас, С.О. Старков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1997. – № 10. – С. 4-26.
2. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов, В.А. Сивов, В.И. Прытков и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
3. Kanzler Ludwig Very Fast and Correctly Sized Estimation of the BDS Statistic / Ludwig Kanzler. – Christ Church and Department of Economics University of Oxford. – 1999. – 95 p.