

УДК 621.391

К.С. Васюта¹, А.Б. Гулей²

¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

²Украинская 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 $x_{n+1} = f(x_n, k)$; $k = k_{ист}$ – параметр отображения (ключ); ξ_n – последовательность независимых случайных величин, распределенных по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ_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) $\hat{k} = k_{эп0}$, 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 $\hat{k} \neq k_{эп0}$ 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 $\lambda_{эп0} = 3,99$, десяти реализаций шума при $N = 1000$. Непрерывной кривой показана зависимость BDS-статистики от оцениваемого параметра в отсутствии 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 $\lambda_{эп0}$, 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.

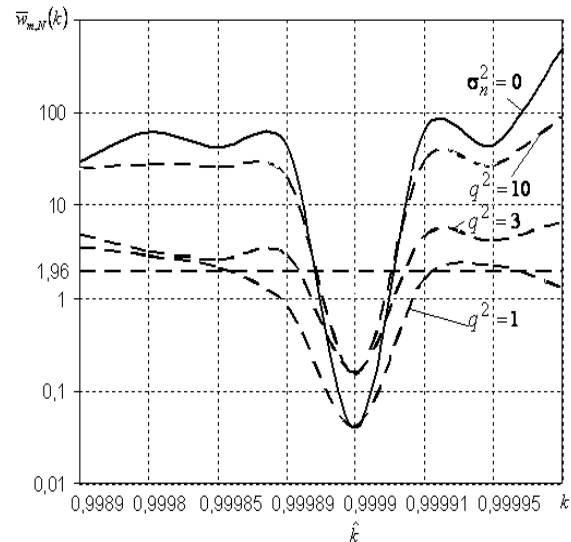


Рис. 1. Зависимость BDS-статистики от изменения значений оцениваемого параметра k

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.