

УДК 621.391

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЦЕЛИ, С ПРИМЕНЕНИЕМ BDS-СТАТИСТИКИ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В работе синтезирован алгоритм оценки времени запаздывания и доплеровского смещения частоты хаотического сигнала, отраженного от радиолокационной цели, на основе применения непараметрической BDS-статистики. Полученный алгоритм позволяет, не опираясь на априорную информацию о плотности распределения вероятности шума, учитывать больше информации о свойствах хаотического сигнала, чем при традиционной корреляционной обработке и приводит к снижению порога оценивания, по сравнению с порогом корреляционного оценивания параметра сигнала неизвестной формы на фоне гауссовского шума в несколько раз.

Ключевые слова: хаотический сигнал, BDS-статистика, оценка времени запаздывания.

Введение

С развитием средств радиоразведки актуальной задачей остается повышение скрытности радиолокационных систем. В связи с этим актуален переход к шумоподобным сигналам (Low Probability of Intercept radar) [1], например ФКМ, ДЛЧМ сигналам, а также хаотическим сигналам. При применении хаотических сигналов необходимо учитывать при обработке особенности их специфических свойств (спектральных, корреляционных, структурированность в псевдо фазовом пространстве) [2]. Отдельно возникает задача оценки параметров отраженных от цели хаотических сигналов, в частности измерения времени запаздывания (дальности).

Применение классических методов (фильтровой, корреляционной обработки) не всегда позволяет получить требуемые оценки параметров при малых отношениях сигнал-шум, что актуально при обеспечении скрытности (применяется малая энергетика сигнала). Поэтому возникает необходимость развития методов обработки, позволяющих дополнить возможности традиционной корреляционной обработки сигналов. В работе [3] показан общий подход оценки параметров сигналов с гармонической и хаотической несущей путем применения непараметрической BDS-статистики.

Однако, еще не получены оценки времени запаздывания хаотического сигнала, отраженного от радиолокационной цели с учетом доплеровского смещения частоты.

Целью данной работы является синтез алгоритма оценки времени запаздывания хаотического сигнала, отраженного от подвижной радиолокационной цели с применением BDS-статистики, опираясь на различия в его топологических свойствах в фазовом пространстве с шумом наблюдения.

Изложение основного материала

Как правило, в радиолокации, применяется байесовский метод измерения параметров сигнала. Согласно которому, оптимальная оценка находится по максимуму после опытной плотности вероятности [4]. На практике для оценки времени запаздывания это сводится к нахождению аргумента максимума модуля комплексного корреляционного интеграла как функции времени запаздывания. При этом среднеквадратическая ошибка измерения определяется в виде

$$\sigma_{t_3} = \frac{\Delta t_3}{q}, \quad (1)$$

где $\Delta t_3 = 1/(2\Pi)$ – мера разрешающей способности по времени запаздывания (Π – ширина спектра сигнала), q – отношение сигнал-шум. Из выражения (1) следует, что среднеквадратическая ошибка измерения обратно пропорциональна отношению сигнал-шум и прямо пропорциональна ширине спектра сигнала.

Традиционные методы не учитывают свойства хаотических сигналов в псевдо фазовом пространстве. Как показано в работе [3], можно осуществлять оценку параметров, с помощью непараметрической BDS-статистики, которая учитывает такие свойства.

Брок, Дечерт и Шейнкман (B. Brock, W. Dechert, J. Scheinkman, 1987), разработали – “BDS-тест”. В его основе [3] лежит свойство распознавать различие между независимыми и одинаково распределенными значениями временного ряда и зависимыми, т.е. значение BDS-статистики для независимых значений временного ряда (распределенных по нормальному закону) лежит в доверительном интервале $[-1,96; 1,96]$. При этом если значение BDS-статистики выходят за пределы доверительного интервала, то с вероятностью 0,99 можно утверждать, что анализируемый процесс не случайный.

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

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}. \quad (2)$$

В работе [5] были предложены очень быстрые алгоритмы для её оценки. Числитель BDS-статистики определяется корреляционными интегралами $C_{m,N}(\varepsilon)$, $C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$, а знаменатель среднеквадратическим отклонением $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ числителя. Для вычисления $C_{m,N}(\varepsilon)$ ($m > 1$) необходимо выполнить «вложение» временного ряда в m -мерное псевдо фазовое пространство, элементами которого, на основании теоремы Такенса (Takens) [6], являются точки $x_i^m = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m})$ с координатами $\{x_{i+k}\}_{k=1}^m$ заданными m последовательными значениями исходного временного ряда. Корреляционный интеграл определяет частоту попадания произвольной пары точек фазового пространства в гиперсферы радиуса ε :

$$C_{m,N}(\varepsilon) = \frac{2}{(N-m+1)(N-m)} \sum_{s=m}^N \sum_{t=s+1}^N \prod_{j=0}^{m-1} I_\varepsilon(x_{s-j}^m, x_{t-j}^m),$$

$$I_\varepsilon(x_i^m, x_j^m) = \begin{cases} 1, & \|x_i^m - x_j^m\| \leq \varepsilon; \\ 0, & \|x_i^m - x_j^m\| > \varepsilon, \end{cases} \quad (3)$$

в котором $I_\varepsilon(x_i^m, x_j^m)$ – функция Хевисайда для всех пар значений i и j , где $0 \leq i \leq N$ и $0 \leq j \leq N$; N – число элементов временного ряда $\{x_i\}_{i=1}^N$. Его значение стремится к определенному пределу по мере уменьшения ε . Рекомендуется выбирать ε таким, что $\varepsilon = 0.5\sigma \div 2\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение процесса $\{x_i\}_{i=1}^N$. В соответствии с теорией, зависимость корреляционного интеграла от ε имеет степенной вид $C_{m,N}(\varepsilon) \sim \varepsilon^{D_c}$, где D_c – корреляционная размерность временного ряда. Для $m=1$ имеем:

$$C_{1,N}(\varepsilon) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{s=1}^N \sum_{t=s+1}^N I_\varepsilon(x_s, x_t). \quad (4)$$

Брок и др. показали, что $C_{m,N}(\varepsilon) \Rightarrow C_{1,N}(\varepsilon)^m$ со стопроцентной вероятностью при $N \rightarrow \infty$, а $(C_{m,N}(\varepsilon) - (C_{1,N}(\varepsilon))^m) \sqrt{N-m+1}$ является случайной асимптотически нормально распределенной величиной с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$, которое определяется как:

$$\sigma_{m,N}(\varepsilon) = 2 \sqrt{k^m + 2 \sum_{j=1}^{m-1} k^{m-j} (C_{1,N}(\varepsilon))^{2j} + (m-1)^2} \times$$

$$\times \sqrt{(C_{1,N}(\varepsilon))^{2m} - m^2 k (C_{1,N}(\varepsilon))^{2m-2}}, \quad (5)$$

где $k = \frac{1}{(N-1)(N-2)N} \left[\sum_{t=1}^N \left[\sum_{s=1}^N I_\varepsilon(x_t, x_s) \right]^2 - 3 \sum_{s=1}^N \sum_{t=s+1}^N I_\varepsilon(x_t, x_s) + 2N \right].$

BDS-статистика $w(\bar{x})$ является нормально распределенной случайной величиной при условии, что оценка $\hat{\sigma}_{m,N}(\varepsilon)$ близка к ее теоретическому значению $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ [7].

Пусть принимаемая реализация описывается аддитивной смесью отраженного сигнала $x_n(t_3)$ (с истинным значением времени запаздывания t_3) и белого шума ξ_n :

$$y_n = x_n(t_3) + \xi_n. \quad (6)$$

Оценка времени запаздывания хаотического сигнала отраженного от цели $x_n(t_3)$ осуществляется по невязке [3]:

$$r_n(t_3) = y_n - s_n(\hat{t}_3), \quad (7)$$

принимаемой реализация y_n и ожидаемого сигнала $s_n(\hat{t}_3)$ с оцениваемым временем запаздывания \hat{t}_3 . Очевидно, что при совпадении оцениваемого времени запаздывания с истинным ($\hat{t}_3 = t_3$) невязка $r_n(t_3) = \xi_n$. В этом случае значение функции (2) от невязки (7) попадает в доверительный интервал $-1,96 \leq \zeta_0 \leq 1,96$. А оцениваемое время запаздывание соответствует истинному в момент времени, когда $w_{m,N}(r_n(t_3)) \Rightarrow \min$.

В общем случае принимаемая реализация состоит из L отраженных сигналов от целей находящихся на различных дальностях в заданном азимутальном направлении. При этом, для получения невязки $r_n(t_3) = \xi_n$ (полагая, что $x_n(t_3) = s_n(\hat{t}_3)$) при обработке реализации y_n на протяжении времени приема T , которое пропорционально максимальной измеряемой дальности, следует производить стробирование y_n импульсами вида

$$U_0(\hat{t}_{31}, \hat{t}_{32}, \dots, \hat{t}_{3L}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t + \Delta t_{3i} \leq \tau; \\ 0, & t > \tau \end{cases} \quad (8)$$

на интервале времени приема $0 \leq t \leq T$ с шагом Δt_3 , $i=1..k$, k – количество дискрет дальности, τ – длительность импульса. Тогда уравнение (7) перепишем в виде:

$$r_n(t_{3i}) = U_0(\hat{t}_{3i}) y_n - s_n(\hat{t}_{3i}). \quad (9)$$

Значение времени запаздывания принимаются истинными в моменты времени Δt_{3i} , в которые

значение функции $w_{m,N}(r_n(t_{3i})) \Rightarrow \min$ и при условии, что $w_{m,N}(r_n(t_{3i})) \leq |\zeta_0|$, $-1,96 \leq \zeta_0 \leq 1,96$.

Эффект Доплера приводит к незначительному искажению, “размытию” фазового портрета отраженного хаотического сигнала, что в дальнейшем влияет на значение невязки. На рис. 1 приведены фазовые портреты хаотического сигнала, полученные численным путем для случаев $F_D = 0$ – рис. 1, а и $F_D \neq 0$ – рис. 1, б.

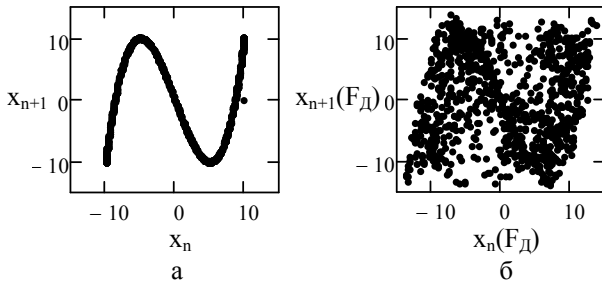


Рис. 1. Фазовые портреты хаотического сигнала для случаев: а – $F_D = 0$; б – $F_D \neq 0$

Следовательно, ожидаемый сигнал $s_n(\hat{t}_3)$ необходимо формировать для предполагаемого диапазона скоростей (частот Доплера - F_D) движения локационных целей. Исходя из этого, схема измерения времени запаздывания хаотического сигнала отраженного от подвижной цели должна быть многоканальной по частоте Доплера, а выражение (9) будет иметь вид

$$r_n(t_{3i}, F_{Dj}) = U_0(\hat{t}_{3i})y_n - s_n(F_{Dj}), \quad (10)$$

где $j = 1..p$, p – кол-во каналов по частоте Доплера.

Тогда оценка времени запаздывания и частоты Доплера осуществляется согласно алгоритма

$$w_{m,N}(r_n(t_{3i}, F_{Dj})) \leq |\zeta_0| \Rightarrow \min. \quad (11)$$

Функциональная схема, реализующая алгоритм оценки времени запаздывания и доплеровского смещения частоты (11) представлена на рис. 2.

Принимаемая реализация поступает на умножители, с помощью которых производится стробирование по времени запаздывания (дальности). Затем сигналы подаются на устройства вычитания, в которых формируется невязка с учетом частоты Доплера. В устройствах реализующих BDS-тест осуществляется вычисление значений BDS-статистики и сравнение их с порогом $|\zeta_0| = 1,96$. Вычисленные значения BDS-статистики поступают на решающие устройство (РУ) предназначенное для определения ее минимального значения. При совпадении оцениваемых времени запаздывания \hat{t}_3 и частоты Доплера с истинными – значения BDS-статистики попадают в доверительный интервал ζ_0 и минимальны.

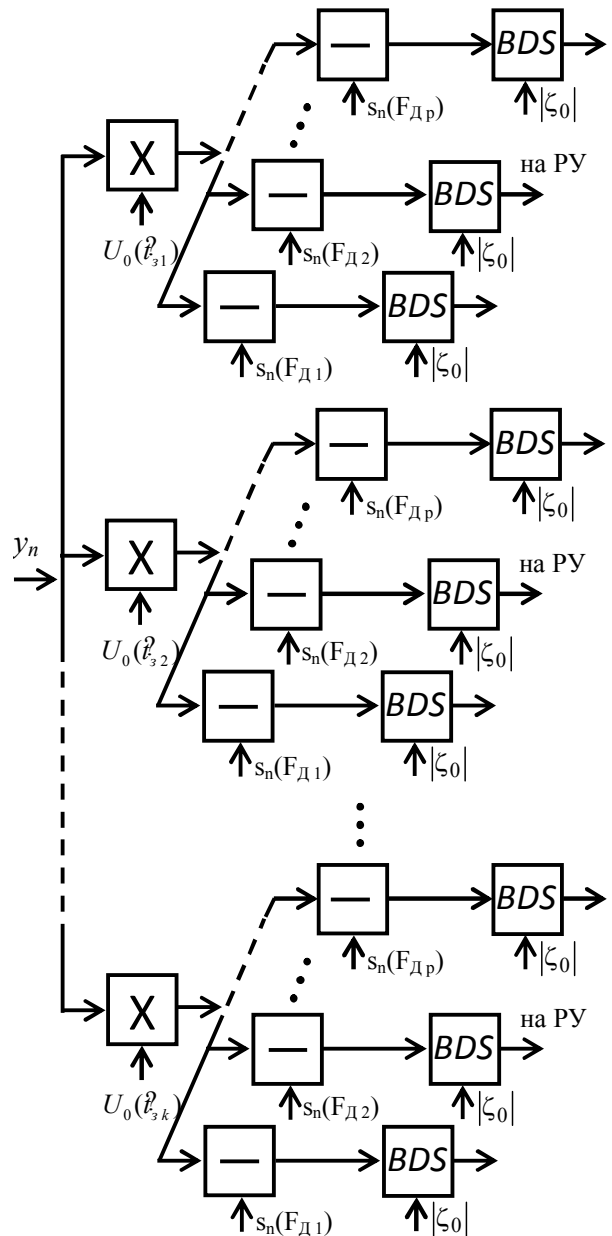


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма оценки времени запаздывания с применением BDS-статистики

На рис. 3 иллюстрируются результаты оценивания времени запаздывания сигнала представленным алгоритмом (рис. 2) для различных отношений сигнал-шум q .

Для оценки точности измерения времени запаздывания с применением BDS-статистики на рис. 4 приведены зависимости ошибки измерения времени запаздывания $\sigma_{t_3}^2 (q^2)$ от отношения сигнал шум q для случаев: максимально правдоподобного оценивания (МП), полученная согласно (1) – сплошная линия; при применении корреляционной обработки (КО) [4] – штрихпунктирная линия с окружностями и с применением предложенного алгоритма (11) основанного на применении BDS-статистики – пунктирная линия с квадратами.

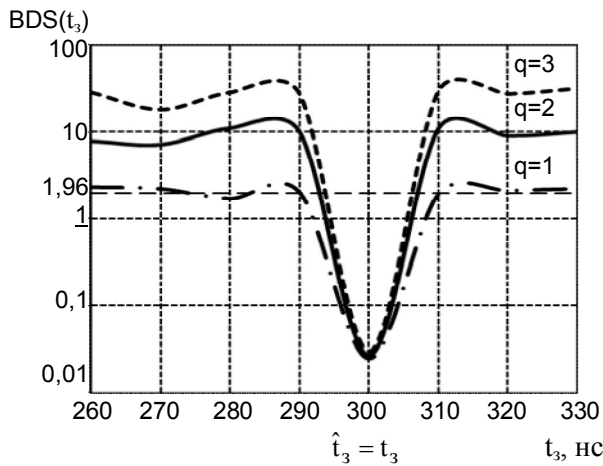


Рис. 3. Зависимость BDS-статистики от времени запаздывания для различных отношений сигнал-шум

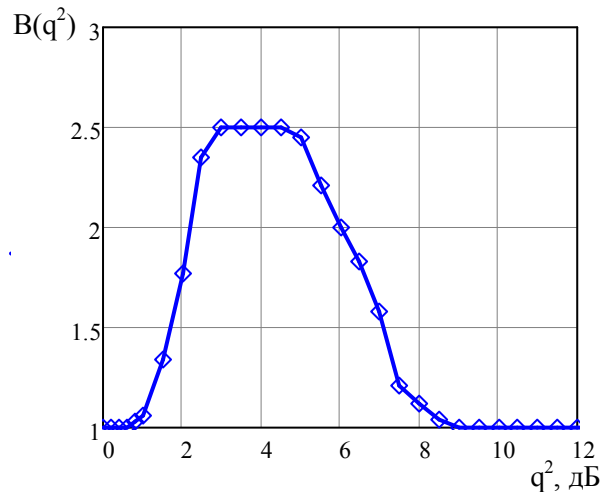


Рис. 5. Зависимость выигрыша в точности измерения времени запаздывания с применением BDS-статистики от отношения сигнал-шум

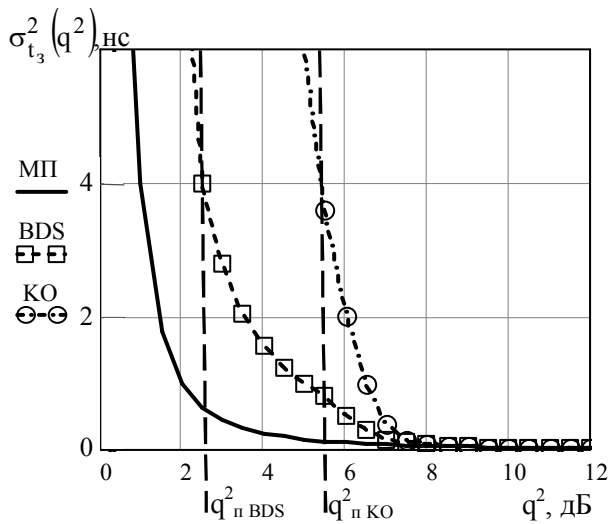


Рис. 4. Зависимость ошибки измерения времени запаздывания от отношения сигнал-шум

Также на рис. 4 показаны пороги $q^2_{п\text{ BDS}}$ и $q^2_{п\text{ KO}}$ для оценки времени запаздывания с применением BDS-статистики и при корреляционной обработке. Из анализа приведенных на рис. 4. зависимостей следует, что применение предложенного алгоритма оценки времени запаздывания хаотического сигнала, отраженного от радиолокационной цели позволяет повысить точность измерения и снизить допустимый пороговый уровень измерения на 3 дБ при той же точности, что и при корреляционной обработке.

На рис. 5 иллюстрируется зависимость выигрыша $B(q^2)$ в точности измерения при применении предложенного алгоритма (11) по сравнению с корреляционной обработкой, который получен, как отношение зависимостей ошибок измерения от отношения сигнал-шум рис. 4.

$$B(q^2) = \sqrt{\sigma_{t_3\text{ KO}}^2(q^2)} / \sqrt{\sigma_{t_3\text{ BDS}}^2(q^2)}. \quad (12)$$

Из рис. 5 видно, что выигрыш в точности составляет 2,5 раза при малых значениях отношения сигнал-шум от 3 до 5 дБ. Имитационное моделирование показало, что и при оценивании доплеровского смещения частоты хаотического сигнала сохраняются такие же закономерности.

Выводы

Таким образом, в работе синтезирован алгоритм оценки времени запаздывания и доплеровского смещения частоты, отраженного от радиолокационной цели сигнала, на основе применения непараметрической BDS-статистики. Он позволяет, не опираясь на априорную информацию о плотности распределения вероятности шума, учитывать больше информации о свойствах сигнала, и приводит к снижению порога оценивания, по сравнению с порогом корреляционного оценивания параметра сигнала неизвестной формы на фоне гауссовского шума на 3 дБ. Применение полученного алгоритма в радиотехнических системах позволит с заданной точностью производить оценку координат целей при малых отношениях сигнал шум, что является актуальным при создании радиотехнических систем с повышенной скрытностью функционирования.

Список литературы

1. Pace P.E. *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar* / P.E. Pace. – Second Edition. – London: Artech house, 2009. – 862 p.
2. Костенко П.Ю. Обнаружение хаотического процесса искаженного белым шумом с использованием BDS-статистик / П.Ю. Костенко, А.Н. Барсуков, К.С. Васюта, С.Н. Симоненко // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 41 – 50.
3. Костенко П.Ю. Использование BDS-статистик для оценки параметров дискретных отображений регулярных и хаотических сигналов при наличии шума /

П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, С.Н. Симоненко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2011. — № 3 (54). — С. 47–55.

4. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: (справочник) / Я.Д. Ширман, А.С. Маляренко, С.П. Леуценко и др. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.

5. 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.

6. Small Michael Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance / Michael

Small // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. — 2005. — 245 p.

7. Смирнов Д.А. Метод оценки параметров одномерных отображений по хаотическим временным рядам / Д.А. Смирнов, В.С. Власкин, В.И. Пономарев // Письма в ЖТФ. — 2005. — Том 31, вып. 3. — С. 18–26.

Поступила в редколлегию 26.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

АЛГОРИТМ ОЦІНКИ ЧАСУ ЗАПІЗНЮВАННЯ ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ ВІДБИТОГО ВІД ЦІЛІ З ЗАСТОСУВАННЯМ BDS-СТАТИСТИКИ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц

У роботі синтезований алгоритм оцінки часу запізнювання і доплерівського зсуву частоти хаотичного сигналу, відбитого від радіолокаційної цілі, на основі застосування непараметричної BDS-статистики. Отриманий алгоритм дозволяє, не спираючись на апріорну інформацію про цілісність розподілу ймовірності шуму, враховувати більше інформації про властивості хаотичного сигналу, чим при традиційній кореляційній обробці і приводить до зниження порогу оцінювання, в порівнянні з порогом кореляційного оцінювання параметра сигналу невідомої форми на фоні гауссівського шуму у декілька разів.

Ключові слова: хаотичний сигнал, BDS-статистика, оцінка часу запізнювання.

ALGORITHM FOR ESTIMATING THE DELAY TIME OF CHAOTIC SIGNAL REFLECTED FROM THE TARGET USING BDS STATISTICS IN RADAR SYSTEMS

C.S. Vasuta, F.F. Zots

Algorithm for estimating the time delay and Doppler frequency shift of the chaotic signal reflected by a radar target based on application nonparametric BDS statistics is synthesized in work. The resulting algorithm allows, without relying on a priori information about the noise probability density function, to allow for more information on the properties of a chaotic signal than conventional correlation processing and reduces the threshold evaluation, compared with a threshold correlation parameter estimation signal of the unknown form in Gaussian noise several times.

Keywords: chaotic signal, BDS statistics, estimate of the time delay